

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

На правах рукописи



Антонов Дмитрий Владимирович

МИКРО-ВЗРЫВНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

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

Томск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Современное состояние исследований характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель	19
Глава 2. Экспериментальные исследования условий и характеристик микро-взрывной фрагментации	33
2.1 Планирование экспериментальных исследований	33
2.3 Технологии формирования капель.....	41
2.4 Методы экспериментальных исследований процессов микро-взрывной фрагментации.....	45
2.5 Варьируемые и регистрируемые параметры.....	57
2.6 Неопределенности измерений	57
2.7 Результаты экспериментов и их обсуждение.....	59
2.7.1 Влияние температуры газовой среды.....	62
2.7.2 Влияние схемы нагрева	64
2.7.3 Влияние соотношения концентраций жидкостей	69
2.7.4 Влияние размеров и технологии формирования капель.....	72
2.7.5 Влияние вязкости, поверхностного и межфазного натяжения жидкостей.....	77
2.7.6 Микро-взрывной распад капель в условиях близких к реальным газопарокапельным технологиям.....	84
2.7.7 Обобщение результатов экспериментальных исследований для капель с разным размером дисперсной фазы (воды).....	96
Глава 3. Теоретические исследования условий и характеристик микро-взрывного распада двухжидкостных капель.....	102
3.1 Известные физические постановки задач тепломассопереноса для изучения фрагментации капель.....	102

3.2 Математические модели и методы решения.....	104
3.2.1 Модель тепломассопереноса в двухжидкостной капле в условиях, предшествующих микро-взрывному распаду, по перегреву границы раздела «вода/топливо» выше температуры кипения воды.....	104
3.2.2 Модель тепломассопереноса до условий микро-взрывного распада по критическому размеру (радиусу) пузыря.....	116
3.2.3 Модель тепломассопереноса до условий микро-взрывного распада по превышению давления в паровой пленке	122
3.3 Апробация и достоверность, верификация разработанных моделей	124
3.4 Результаты математического моделирования и их обсуждение.....	128
3.4.1 Влияние температуры внешней среды	128
3.4.2 Влияние соотношения концентраций жидкостей	130
3.4.3 Влияние начальных размеров капель жидкостей	132
3.4.4 Влияние давления внешней газовой среды.....	134
3.4.5 Кондуктивный, конвективный и радиационный нагрев.....	135
3.4.6 Влияние коллективных эффектов в совокупности капель	137
3.4.7 Критерии микро-взрывного распада капель	147
Заключение.....	152
Список условных обозначений и символов.....	155
Список процитированной литературы.....	159

Введение

Традиционно при разработке и модернизации топливных технологий основное внимание уделяется решению ограниченной, но в то же время наиболее значимой группы первостепенных задач [1]. В частности, активно проводятся исследования [1] 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 процессов приготовления, хранения, транспортировки 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 довольно невысокий коэффициент полезного действия [2–4]. Это обусловлено тем, что очищаемую жидкость приходится повторно циклически подавать в камеру термической очистки. Примеси не успевают выпариться (осесть 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 принято считать дробление капель топлив или очищаемых жидкостей до характерных размеров десятков и сотен микрометров. Но эксперименты [5–7] показали, что такие мелкие капли уносятся из камеры термической очистки при малых скоростях движения (вследствие высоких скоростей движения разогретых дымовых газов или встречного воздушного потока), налипают и оседают 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-взрывного распада (интенсивного дробления) с образованием топливного аэрозоля. В основном пока можно выделить лишь немного экспериментальных и теоретических исследований (например, [8–15]) условий и характеристик микро-взрывного распада капель жидкостей, эмульсий, растворов и суспензий, их последующего распада с образованием аэрозоля.

Одними из первых на длительную фрагментацию (разбрызгивание) и кратковременный микро-взрывной распад вскипающих капель топлив обратили внимание исследователи из Японии [8–10]. Ими было установлено, что определяющую роль могут играть межмолекулярные взаимодействия, а также число и концентрации формирующихся пузырьков паров в каплях. В [8–10] показано, что для разрушения насыщенных газами CO_2 капель водных эмульсий требуется меньший перегрев и меньшее время нагрева, что связано со снижением энергии зарождения пузырьков. Эти результаты позволяют объяснить причины более интенсивного прогрева и фрагментации капель водных эмульсий. В [8–10] микро-взрывной распад капель эмульсий реализовывался при высокой концентрации нефтепродукта и высоких значениях температуры. Именно в таких условиях роль CO_2 значительна в соответствии с заключениями [8–10]. Поэтому процессы фрагментации капель водных эмульсий реализовывались за малые интервалы времени нагрева и завершались формированием большого аэрозольного облака с характерным запахом CO_2 . С использованием разработанной на основе опытов [8–10] упрощенной математической модели можно прогнозировать влияние растворенного CO_2 на прогрев и фрагментацию капель водных эмульсий.

Важной фундаментальной задачей является анализ влияния эффектов агрегации и коагуляции дисперсных капель воды, а также растворенного CO_2 на

процессы поглощения и пропускания радиационного теплового потока. Вследствие разной поглощательной способности жидких топлив (или горючих жидкостей) по сравнению с водой эти эффекты могут быть определяющими. К тому же, интегральные характеристики процессов поглощения и пропускания радиационного теплового потока каплями жидкостей существенно изменяются при формировании пузырьков, заполненных газами, парами и воздухом. Например, вода может становиться менее прозрачной при нагревании. Установлено [16,17], что по мере нагревания плотность воды снижается, и присутствующие в ней молекулы поверхностно-активных веществ (их концентрация обычно составляет менее 0.1 % по массе) начинают гидрофобно взаимодействовать. В результате происходит слияние внутренних водяных капель, приводящее к дальнейшему формированию крупного водяного ядра.

Также широкую известность получили результаты исследований процессов сжигания топливных аэрозолей в камерах сгорания двигателей и котлов (например, группа исследователей [11,12]). Процессы дробления топливных струй и пленок в авиационных и автомобильных двигателях потоком окислителя исследованы в [13]. Акцент на эффектах самопроизвольного дробления неоднородных топливных капель сделан в [14,15]. Однако исследованы лишь водные эмульсии, и методика исследования включала лишь использование инфракрасной съемки. На основании анализа данных [11–15] можно выделить существенное изменение площади поверхности испарения с учетом образующихся фрагментов, уменьшение суммарной длительности фазового перехода.

Попытки разработки с использованием экспериментальных зависимостей и соответствующих коэффициентов численной модели дробления топливных пленок воздушным потоком предприняты в [14,15]. Показана удовлетворительная корреляция результатов экспериментальных и численных исследований объема пузырей и характеристик дробления топливной пленки на этапе подготовки топливно-воздушной смеси к зажиганию. Однако не применялись методы,

позволяющие достоверно оценить температурные поля неоднородных капель (в том числе и выявить предельные значения температур на границах контакта двух жидкостей, при которых возникает эффект микро-взрывного распада). Как следствие, механизм реализации процессов дробления капель не в полной мере изучен. Важно использовать комбинированные схемы измерений с применением контактных и бесконтактных способов регистрации температурных градиентов для уточнения критериев микро-взрывной фрагментации.

В [18–21] предприняты попытки применения таких комбинированных схем измерений на основе малоинерционных термопар, а также оптических методов высокоскоростной кросскорреляционной регистрации: Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) [21–26], Laser Induced Phosphorescence (LIP) [27], Particle Image Velocimetry (PIV) [28], Interferometric Particle Image (IPI) и Shadow Photography (SP) [29] и др. Основные результаты [18–21] заключаются в установлении предельных условий локального вскипания двухфазных капель («вода/твердое включение»), основных характеристик этих процессов: длительность прогрева, скорости трансформации поверхности, число и размеры образующихся капель.

При анализе результатов экспериментов [18–21] выделены стадии парообразования неоднородной капли: испарение с ее свободной (внешней) поверхности, пузырьковое кипение на внутренних границах раздела сред, рост пузырьков и увеличение размеров капли с уменьшением толщины пленки, микро-взрывной распад капли (отделение группы фрагментов – мелких капель с пузырьками пара и воздуха). Также установлено, что добавление мелких (до 0.05 мм) непрозрачных углеродистых включений (с массовой концентрацией до 2 %) в капли воды способствует снижению времен существования последних на 40–50 % по сравнению с каплями, содержащими одно непрозрачное твердое включение в режиме испарения со свободной поверхности. Установлены масштабы влияния формирующегося вокруг капель парового слоя (выступающего в качестве

дополнительной тепловой изоляции в силу малой теплопроводности) на интенсивность их испарения.

Установлены [18–21] интегральные характеристики процессов фрагментации, трансформации поверхности, перегрева капель воды и суспензий на ее основе при доминировании радиационного теплового потока со стороны внешней газовой среды над конвективным. Определены необходимые и достаточные условия для реализации эффектов микро-взрывного дробления капель водных суспензий с группой углеродистых и грунтовых примесей, а также довольно медленного и стадийного испарения с сохранением целостности капли. Созданы первые упрощенные модели тепломассопереноса с учётом возникновения микро-взрывного дробления капель при нагреве в высокотемпературных газовых средах [18–21]. С использованием метода PLIF [20,21] получены калибровочные кривые, устанавливающие зависимости светимости жидкого топлива от его температуры. С приготовленными эмульсиями, растворами и суспензиями такие эксперименты пока не проводились. Нерешенными остаются задачи поиска методов управления характеристиками процессов микро-взрывного распада (дробления) капель топлив, эмульсий, растворов или суспензий. Важно разработать физические и математические модели для достоверного прогнозирования последствий дробления капель вследствие локального перегрева, возможных режимов протекания этих процессов, отличий для разных схем перемешивания и др. Данные задачи можно успешно решить при наличии достоверной экспериментальной базы данных с характеристиками и условиями реализации данных эффектов.

Целью данной 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. 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.

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).

Степень достоверности полученных теоретических и экспериментальных результатов. 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. Var-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 г.
- ✓ Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2015, 2016, 2017 г.
- ✓ 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 г.
- ✓ 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 г.

- ✓ Всероссийская конференция «XXXIV Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 2018, 2019, 2020 г.
- ✓ 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 г.
- ✓ 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 энергетики», 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 T. 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 работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, содержит 52 рисунка, 5 таблиц, 178 страниц.

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 микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель. Проанализированы известные результаты исследований закономерностей, условий и характеристик микро-взрывной фрагментации жидкостей. Рассмотрены установленные ранее особенности быстропротекающих 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.

Во второй главе представлены: описание созданных экспериментальных стендов; разработанные методики проведения исследований и обработки полученных результатов; оценка 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).

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.

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

Глава 1. Современное состояние исследований характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель

Тенденция проводимых в последние годы исследований в области микро-взрывной фрагментации связаны с изучением предельных (необходимых и достаточных) условий, режимов распада и характеристик распада двухжидкостных капель. Анализ современного состояния исследований в мире по заданной тематике позволяет сделать вывод о том, что процессы измельчения сложных по составу капель изучаются экспериментально и теоретически коллективами научных центров и лабораторий Японии [10,30–36], Германии [37], США [38–46], Франции [14,15,47–52], Китая [53–62], Малайзии [63–66], Индии [67–71], Великобритании [72–75] и России [76–92]. Можно выделить в качестве лидеров следующие центры, институты и университеты: National Research Institute of Police Science, 6-3-1, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-0882, Japan; Interdisciplinary Center for Scientific Computing (IWR), University of Heidelberg, 69120 Heidelberg, Germany; Department of Mechanical Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI, USA; Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, Tamilnadu 600036, India; Fluid Sir Harry Ricardo Laboratories, Advanced Engineering Centre, School of Computing, Engineering and Mathematics, University of Brighton, Brighton BN2 4GJ, UK; Center for Automotive Research and Electric Mobility (CAREM), Universiti Teknologi PETRONAS, 32610 Seri Iskandar, Perak, Malaysia; Институт проблем безопасного развития атомной энергетики; Объединенный институт высоких температур РАН; Московский государственный университет; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН; Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН; Уральский государственный университет путей сообщения; Институт теплофизики УрО РАН; Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Согласно [93] первые упоминания о микро-взрывных эффектах представлены В.М. Ивановым и П.И. Нефедовым [94] в 1962 году, но наиболее интенсивно данное направление стало развиваться лишь в 2000-е годы в связи с развитием регистрационной техники и методов. На рис. 1.1 отражен рост публикационной активности в области исследований процессов микро-взрывной фрагментации капель топлив по запросу «micro-explosion» («микро-взрыв»).

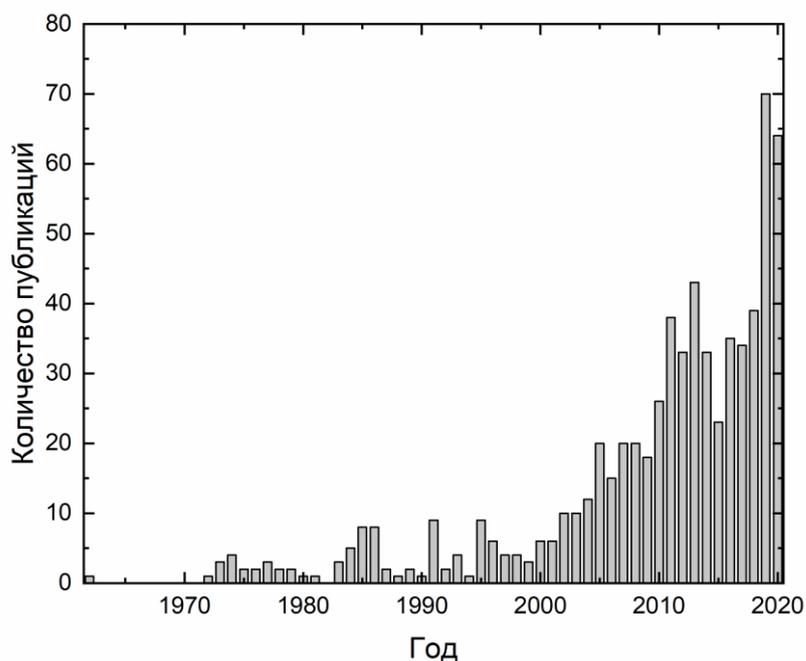


Рисунок 1.1 – Распределение по годам публикаций (статей, докладов и обзоров) в области исследований процессов микро-взрывной фрагментации капель топлив согласно данным из реферативной базы «Scopus».

Рассматриваемая научная область охватывает широкий диапазон направлений исследований и практических приложений. Постоянный рост публикационной активности свидетельствует о развитии существующих, а также создании совершенно новых энергетических технологий в области ресурсо- и энергоэффективных направлений. В частности, энергоэффективное зажигание капель топлив в камерах сгорания двигателей, топках паровых и водогрейных котлов, печей и других промышленных установок является важной проблемой как с точки зрения рационального расходования энергоресурсов, так и с точки зрения снижения негативного антропогенного воздействия на окружающую среду [82].

Интенсификация процессов прогрева и испарения капель жидкости существенно снижает временной интервал, предшествующий воспламенению топлива, а также повышает полноту выгорания последнего [79,95,96]. Одним из возможных способов повышения скоростей прогрева и испарения топлива является впрыск его в топочную камеру в виде аэрозольного потока с использованием форсуночных устройств, распылительных насадок и адаптеров. Однако для обеспечения наибольшей эффективности процесса зажигания необходимо устанавливать оптимальные характеристики распыления, исключая явления коагуляции капель, изменения направления их движения и уноса газовым потоком из регламентной зоны горения. Перспективным способом диспергирования жидкостей (смесей топлив, водотопливных эмульсий и суспензий) является использование эффекта взрывного дробления (микро-взрыва) вследствие возникновения (зарождения) паровых пузырей на границах раздела жидкостей [78,92,97]. Однако для контролируемого применения эффекта микро-взрывного распада топливных капель при нагреве необходимо проведение экспериментальных и теоретических исследований закономерностей его возникновения и развития (в частности, основных количественных результирующих индикаторов).

Механизмы процессов прогрева, испарения и микро-взрывного распада различны для капель эмульсий и суспензий [14,98–105]: для первых основной причиной дробления капель является разница давлений и температур насыщения, а также теплофизических свойств жидкостей, для вторых – наличие микроцентров парообразования на поверхности твердых примесей (частиц) в капле. Определение условий интенсификации эффектов дробления двухжидкостных капель широко используемых топливных составов создаст предпосылки для применения таких эффектов в реальных технологиях. Широкая база экспериментальных данных может быть использована в качестве основы для разработки прогностических моделей, позволяющих выполнять достоверные

расчеты характеристик испарения двухжидкостных капель с учетом эффекта микро-взрывного распада последних [13,14,105].

Процессы испарения двухжидкостных капель (эмульсий, суспензий, растворов) широко распространены во многих технологиях [11,13,14,19–21,104,105]: сжигание жидких топлив и топливных композиций в двигателях и теплогенерирующих установках, технологии разделения эмульсий и суспензий на компоненты (выпаривание, сушка, выжигание), термическая очистка сточных вод, тушение пожаров специализированными смесевыми составами и др. Значительной интенсификации процесса испарения жидкостей в капельном состоянии можно добиться путем диспергирования потока при использовании специальных технических устройств (форсунок, насадок, адаптеров, решеток и др.). Однако при испарении двухжидкостных капель в качестве меры повышения эффективности и скорости испарения может быть использован эффект микро-взрывного дробления. Как правило, исследования подобных эффектов выполняются научными группами по заказу компаний-производителей автомобильных двигателей с целью повышения их эффективности; крупных нефтеперерабатывающих компаний, стремящихся таким образом осуществлять контроль качества производимого топлива. Например, можно выделить результаты [11,13,14,19–21].

В [19–21] показано, что площадь испарения жидкостей, суспензий и эмульсий может в несколько (до 10–15) раз вырасти вследствие микро-взрывного измельчения капель при нагревании. Актуальна задача определения диапазонов роста площади испарения жидкостей при разных механизмах подвода энергии к поверхности капли: конвективный, кондуктивный и радиационный. В [106] показано с использованием метода PLIF, что скорости прогрева и испарения капель воды при кондуктивном, конвективном и радиационном нагреве существенно отличаются. Скорости прогрева капель воды наибольшие при кондуктивном нагреве и находятся в диапазоне от 0 до 100 К/с, наименьшие при радиационном нагреве – от 0 до 30 К/с; а скорости испарения капель воды

наибольшие при конвективном нагреве – от 0.01 до 0.07 кг/(м²·с), наименьшие при кондуктивном нагреве – от 0.005 до 0.025 кг/(м²·с). Как следствие, режимы и последствия прогрева, испарения и измельчения могут также отличаться для разных схем нагрева. Важно такие оценки провести для развития группы технологий, в первую очередь, топливных [1].

Для совершенствования существующих и создания принципиально новых технологий термической очистки технологических и сточных вод (в частности, в виде распыленного потока) необходимы знания физики процессов, протекающих при движении капель водных растворов, суспензий и эмульсий через высокотемпературные (более 500 К) газы (воздух, продукты сгорания топлив). До настоящего времени теория тепломассопереноса и фазовых превращений для таких условий пока не разработана. Однако в последние годы получены экспериментальные результаты, являющиеся определенными предпосылками для создания такой теории (например, [107–109]). Подробные теоретические результаты исследований таких процессов пока не опубликованы. Это обусловлено сложностями математического моделирования при большом числе границ раздела сред с существенно нелинейными краевыми условиями, соответствующими интенсивному парообразованию. Данные сложности выделены в обзорной статье [1], посвященной анализу проблем, сдерживающих развитие моделей интенсивного прогрева и испарения капель топлив, а также эмульсий на их основе.

Результаты экспериментов [108] позволили установить, что идущие первыми капли существенно влияют на условия теплообмена последующих с разогретой газовой средой. Сформулирована гипотеза [109] о том, что первые капли вследствие интенсивного парообразования значительно снижают температуру газов во фронте (на 10–15 К) всех последующих капель. Таким образом, создается своего рода система тепловой защиты последующих капель в виде паровой завесы с более низкой температурой, чем газовой среды перед первыми каплями. До настоящего времени не получены экспериментальные или

теоретические результаты исследований таких элементов тепловой защиты интенсивно испаряющихся и фрагментирующих неоднородных капель. Важно получить достоверные экспериментальные данные и, соответственно, на их основе разработать адекватные физические и математические модели тепломассопереноса. Анализ результатов [1] позволяет сделать вывод, что решить сформулированную научную проблему можно, скорее всего, лишь с применением группы оптических методов. Необходима достоверная информация о температурных распределениях в каплях воды, растворах, суспензиях и эмульсиях на ее основе при их интенсивном нагреве. В то же время из анализа результатов [1] можно сделать вывод о том, что нестационарный процесс прогрева капли оказывает существенное влияние на время ее существования (полного испарения). Как следствие, в таких условиях сложно считать правомерными известные допущения о постоянстве температурного поля капли в процессе испарения.

В [110] предприняты попытки анализа роли градиента температуры испаряющейся капли при разработке упрощенных математических моделей процесса. По результатам проведенного исследования сформулированы безразмерные критерии, позволяющие оценить величину температурного градиента в пределах капли и его влияние на скорость испарения жидкости. Однако экспериментальные данные, позволяющие сделать выводы о достоверности подобных оценок пока не опубликованы. Задача усложняется также необходимостью проведения исследований в условиях высоких температур газовой среды (более 800 К). В [111] показано, что известные кинетические и диффузионные модели испарения [112–114] позволяют получить удовлетворительное соответствие результатов теоретического исследования с экспериментальными данными только в области умеренных температур внешней газовой среды (до 800 К).

Испарение фрагментирующих капель жидкостей остается пока слабо изученным процессом. Интенсивность этого процесса зависит как от температуры

поверхности фазового перехода, так и от концентрации паров жидкости в прилегающей к поверхности раздела сред малой по размерам области. Диффузия и теплопередача в такой области являются движущими силами испарения. Экспериментальные данные процессов тепло – и массопереноса вблизи поверхности испаряющихся капель пока не опубликованы.

Условия и характеристики микро-взрывного дробления капель водных эмульсий и суспензий при нагреве в газовой среде исследованы экспериментально [8–10]. Установлено, что для микро-взрывного измельчения двухжидкостных капель необходимо достижение температуры на границе раздела «вода/топливо» значений, соответствующих температуре кипения воды. Бесконтактный метод PLIF позволил установить, что перед распадом температура воды вблизи данной границы раздела достигала 373.15–393.15 К. Определены пороговые значения температуры возникновения этого эффекта для группы твердых (угольные частицы) и жидких органических примесей (дизельное топливо, рапсовое масло, трансформаторное масло, керосин, бензин и т.д.). Выявлено, что в результате микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель площадь поверхности испарения увеличивается до 15 раз. Важно расширить экспериментальную базу данных с характеристиками испарения типичных составов промышленных сточных вод для повышения эффективности технологий их термической очистки.

Наиболее широко применяемым подходом к изучению условий и характеристик процесса измельчения капель жидкостей, эмульсий, растворов и суспензий является их помещение в разогретый газовый поток на держателе (например, [8–10, 19–21]). Иногда применяют установки без держателей [8–10, 19–21] или с подложками [106]. Каждая из схем регистрации имеет свои ограничения и преимущества [115]. С точки зрения оптимизации затрат и сложности проведения эксперимента, а также достоверности процедуры регистрации условий и характеристик измельчения наиболее рациональным все-таки представляется использование держателя, но выбор материала при его участии пока остается не изученным в полной мере, особенно для задач измельчения

капель жидкостей, эмульсий, растворов и суспензий. Представляет интерес изучение этого фактора с большой группой традиционно используемых материалов и типичными двухжидкостными каплями. Решение данной задачи принципиально важно для развития перспективных газопарокапельных технологий, рассмотренных в [98,99,116]. Для условий зажигания капель топливных суспензий влияние материала держателя установлено в [115]. Показано, что имеются два диапазона температур, для первого из которых влиянием материала держателя можно пренебречь (выше 900 К), а во втором (ниже 900 К) свойства материала держателя оказывают существенное влияние на теплоперенос. Важно такие оценки провести для перспективных топливных эмульсий.

Согласно результатам исследований [117] слишком мелкие (до 100 мкм) капли могут быть унесены из зоны нагрева при малых скоростях движения (до 1 м/с). Их унос может быть вызван встречным движением разогретых газов и термогравитационной конвекцией [117]. Также достаточно большая доля мелких капель вследствие турбулентных пульсаций контактирует со стенками нагревательных камер [117]. Поэтому существенное измельчение капель до 100 мкм и меньше перед подачей в камеры сгорания, теплообменные агрегаты контактного типа или блоки для термической очистки жидкостей может вызывать дополнительные сложности в эксплуатации, и не только не увеличить, но даже и снизить коэффициент полезного действия установок.

В этом случае процессы микро-взрывного измельчения являются актуальными, так как позволяют рационально измельчать капли с образованием аэрозоля непосредственно в нагревательных камерах [20]. В настоящий момент данное направление активно развивается как для эмульгированных капель, так и двухжидкостных (могут образовываться при пересечении струй с разными жидкостями, например, вода и дизельное топливо). Пока основные результаты исследований в этом направлении получены при проведении экспериментов. В частности, в [20,118] установлено, что на последствия микро-взрыва

двухжидкостных капель существенное влияние оказывают такие параметры как соотношение концентраций горючих и негорючих жидкостей, их свойства, а также температура потока греющих газов (соответственно, подведенный тепловой поток). В [20] также установлено, что максимальному эффекту микро-взрывного дробления соответствуют минимальные объемные концентрации воды (не более 5–10 %), что позволяет увеличить площадь поверхности испарения более чем в 100 раз. Исследования [118] показали, что расход греющей среды в значительной степени влияет на характеристики микро-взрыва: чем выше расход разогретых газов, тем ниже времена задержки микро-взрыва и выше его эффективность. В [43,119–121] на основе анализа результатов опытов показано, насколько микро-взрыв влияет на характеристики горения и зажигания топлив (дизельное топливо, бутанол, биодизель). Установлено, что микро-взрыв позволяет повысить скорость горения и снизить образование сажи [43,119,120] за счет повышения интенсивности смешивания топлива с окружающими окисляющими газами. Также отмечено, что соотношение концентраций жидкостей оказывает существенное влияние на характеристики распыления и, соответственно, зажигания топлива [43,119,120]. Результаты экспериментального исследования [121] показывали, что на предельные условия реализации микро-взрыва существенное влияние оказывают режимы формирования двухжидкостных капель при взаимодействии жидкостей. Так, например, для коагулирующих капель вероятность возникновения пузырька в капле возрастает с увеличением скорости столкновения, что в свою очередь повышает вероятность реализации микро-взрыва. В [121] также установлено, что микро-взрыв позволяет значительно повысить скорость горения. На процесс дробления капель жидкостей также оказывает значительное влияние концентрация растворенного CO_2 . По результатам экспериментов [10] установлено, что капли эмульгированного топлива, насыщенного CO_2 , распадаются быстрее и при меньшей степени перегрева, чем капли дегазированного топлива. На основании полученных данных в [10] предложено математическое выражение, описывающее времена начала

процессов диспергирования («паффинг»), которое показало удовлетворительную корреляцию с результатами экспериментов.

Кроме последствий микро-взрыва и возможных изменений характеристик процессов прогрева, испарения, зажигания и горения топлив, недостаточно изучены механизмы микро-взрывного дробления двухжидкостных капель. К настоящему времени сформулировано несколько гипотез о физике этих процессов, которые представлены в [18,122–125]. В [122] за счет серии достаточно трудоемких экспериментов установлено, что возникновению микро-взрыва предшествует образование одного или двух пузырей вблизи центра капли, что способствует более полной фрагментации. На образование пузырей существенное влияние оказывает разница волатильности жидкостей. Для образования пузыря в капле необходим ее прогрев до температуры кипения менее волатильного компонента [122]. Исследования [123] выявили, что на образование пузырьков в капле с ее последующим разрушением оказывает влияние степень перегрева (должен достигаться критический перепад температуры). Установлено [123], что разрушение происходит вследствие расширения пузырей в капле и снижения её поверхностного натяжения из-за перегрева. Также в настоящее время в качестве одного из механизмов распада выделяют высокие скорости конвективных течений на границе раздела двух жидкостей, вследствие чего происходит разрыв границы раздела «вода/топливо» и затем полный распад капли [18]. При моделировании распад капель часто связывают с критическими значениями чисел Вебера и Рейнольдса [124,125]. С увеличением числа Вебера жидкостная структура стремится к разрушению на мелкие капли, и турбулентная диссипация, как правило, подавляется. Для малых значений чисел Вебера установлены критические значения чисел Рейнольдса, соответствующие началу распада капель. В [124,125] показано, что в основном процесс нагрева при малых значениях чисел Вебера существенно влияет на процессы микро-взрыва.

В качестве одной из первых моделей микро-взрыва типичных двухжидкостных капель можно выделить представленную в [126]. При нагреве в

центре капли концентрируется менее летучий компонент, который может нагреваться до температур, достаточных для зарождения центров парообразования, что и приводит к фрагментации исходной капли [126]. Попытки разработки с использованием экспериментальных зависимостей и соответствующих коэффициентов математической модели дробления топливных пленок воздушным потоком предприняты в [14,15]. Показана удовлетворительная корреляция [14,15] результатов экспериментальных исследований и численного моделирования при определении характеристик дробления топливной пленки на этапе подготовки топливно-воздушной смеси к зажиганию. До последнего времени не применялись методы, позволяющие достоверно оценить температурные поля неоднородных капель (в том числе и выявить предельные значения температур на границах контакта жидкостей, при которых происходит взрывной распад), например, Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) [18]. Предварительные результаты применения такого метода при изучении характеристик прогрева и распада неоднородных капель показаны в [18]. На основе данных [18] сформулировано заключение о том, что одним из основных условий распада неоднородных капель может быть достижение температуры кипения воды. В опытах [18] установлено, что перед распадом на границе раздела «вода/топливо» температура достигает значений 363–393 К. Эти результаты показывают, что вблизи данной границы раздела достаточно высока концентрация водяных паров, которые в основном и формируют пузыри. Появление экспериментальных результатов [18] стало одной из причин интенсификации теоретических исследований, так как критерии прогрева до условий микро-взрывного распада капель могут быть существенно упрощены. Например, можно считать таким критерием достижение температуры на границе раздела «вода/топливо» значений температуры кипения воды. В последние годы в этом направлении активизировались исследования во всем мире. В частности, в [73] представлена упрощенная модель микро-взрывного распада, основанная на решении уравнения теплопроводности. В качестве критерия микро-взрывного

распада использована критическая температура на границе двух жидкостей (соответствующая кипению воды). Принимается ряд ограничений, которые существенно упрощают вычисления, но в тоже время отдаляют результаты моделирования от экспериментальных данных [73]. Лишь при высоких температурах и давлениях в нагревательной камере, а также чрезвычайно малых размерах капель можно обеспечить удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных характеристик. Такие выводы сформулированы в [73] при сопоставлении результатов экспериментов и математического моделирования. Разработанная модель [73] позиционируется как первое приближение, достаточное для выполнения прогностических оценок характеристик микро-взрывного распада капель топливных эмульгированных композиций.

Также широко применяемые в настоящее время модели микро-взрывного распада, например, [54,57,73,74,127–129] имеют ряд ограничений, связанных с учетом группы параметров и механизмов, установленных в экспериментах [18,122–125], а также исключением из рассмотрения некоторых процессов и эффектов по причине отсутствия адекватных экспериментальных сведений или сложностей вычислений. Известны специфические факторы и процессы (основные обсуждены в [73]), сдерживающие создание единой и унифицированной модели микро-взрывного распада двухжидкостных капель и эмульгированных топлив. По этим причинам перспективным представляется выполнение теоретических и экспериментальных исследований процессов прогрева и микро-взрывного распада жидкостей с использованием наиболее типичных критериев разрушения.

Выводы по первой главе

1. Под микро-взрывом принято понимать кратковременный распад родительской двухжидкостной капли, вызванный микро-взрывным кипением внутренних водяных капель, при котором происходит образование большой совокупности

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 додекан), керосин (или декан), биодизель (или рапсовое масло) в качестве горючих жидкостей.

2. Методы интенсификации теплообмена за счет микро-взрывных эффектов активно начали развиваться в 2000-ых годах. 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 [10,30–36], Германии [37], США [38–46], Франции [14,15,47–52], Китая [53–62], Малайзии [63–66], Индии [67–71], Великобритании [72–75] и России [76,77,85–91]. 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.
3. Исследование предельных условий микро-взрывных эффектов является 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.
4. Незучеными 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).
5. 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 границы раздела «вода/топливо» выше температуры кипения воды и росту пузыря не взаимосвязаны.

6. Целесообразным является проведение экспериментальных и теоретических исследований характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель для развития группы газопарокапельных технологий.
7. Следует экспериментально и теоретически определить характеристики теплопереноса и фазовых превращений в двухжидкостных каплях в условиях реализации микро-взрывных эффектов, исследовать влияние группы основных варьируемых параметров системы «двухжидкостная капля или эмульсия / 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.
8. 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.

Глава 2. Экспериментальные исследования условий и характеристик микро-взрывной фрагментации

По результатам предварительно выполненного анализа в главе 1 установлено, что определяющее влияние на основные характеристики и условия микро-взрывного распада капель оказывает ограниченная группа факторов: материал и концентрация жидкостей, начальные размеры капель и подведенный к поверхности капли тепловой поток (температура нагрева, соответственно). В главе 2 представлены основные результаты экспериментальных исследований для ограниченной группы факторов, выделенных в главе 1, которые оказывают наибольшее влияние на условия и характеристики микро-взрывной фрагментации.

2.1 Планирование экспериментальных исследований

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). Кроме того, важным было изучение основных режимов существования и микро-взрывного распада капель при интенсивном нагреве.

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 [2,63,68] 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 каплей 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».

При проведении экспериментов в качестве жидкостей в топливной эмульсии использовались типичные для топливных технологий, а также технологий термической и огневой очистки жидкостей от нерегламентированных примесей 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 %.

Высокотемпературный нагрев двухжидкостных капель осуществлялся с использованием нескольких схем с доминированием радиационного, конвективного и кондуктивного теплового потока. Наибольший интерес представляли схемы с конвективным и радиационным нагревом, так как они приближали лабораторные эксперименты 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. Для формирования высокотемпературной газовой среды за счет сжигания жидких горючих веществ использовались такие виды топлива как этиловый спирт (температура пламени до 1120 К) и бутан-пропановая газовая смесь (температура пламени до 1450 К). 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.

Для получения двухжидкостных капель («вода/топливо») заданного объема использовались два электронных дозатора Finnpiette 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.

Измерение скорости потока воздуха осуществлялось бесконтактным оптическим методом цифровой трассерной визуализации Particle Image Velocimetry (PIV). Трассирующие частицы (диоксид титана TiO_2) вводились в поток высокотемпературных газов в нижней части цилиндра (аналогично методике [128]).

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 и существования двухжидкостных капель, времена задержки начала распада, времена существования, начальные размеры капель, а также размеры и число вторичных фрагментов.

Для регистрации температуры воды в двухжидкостных каплях использовался метод PLIF. Для реализации метода PLIF 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.

Метод лазерной индуцированной фосфоресценции Laser Induced Phosphorescence (LIP), как и метод PLIF, использовался для регистрации температуры в двухжидкостных каплях. Метод LIP основан на регистрации излучения частиц – люминофоров $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ специализированными CCD видеокамерами с набором светофильтров. В общем случае метод LIP базируется на том, что излучение люминофоров зависит от температуры. Особенностью метода LIP является использование одновременно двух высокочувствительных CCD видеокамер Imager M-lite 2M (разрешение кадра 1920x1280 пикселей, частота съемки 10 кадров в секунду, разрядность 12 бит) с объективами Nikon 200mm f/4 AF-D Macro, оснащенными комплектом светофильтров и набором цилиндрических линз. Продолжительность фактического измерения определяется временем распада люминофора. Для используемого люминофора продолжительность при комнатной температуре равна примерно 1 люмен в секунду и уменьшается с ростом температуры. Для разделения и фильтрования двух каналов применялся светоделитель (цветность T445LP) в комбинации с двумя интерференционными фильтрами (Edmund Optics 466 нм, цветность 420 нм). Использование блока сведения (светоделителя) позволяло минимизировать относительное искажение и различия изображений с различных CCD видеокамер.

2.2 Экспериментальные стенды

Условия теплообмена в проведенных экспериментах изменялись в соответствии со схемами на рис. 2.2.1-2.2.5: нагрев в потоке разогретых газов

(рис. 2.2.1); нагрев в трубчатой муфельной печи (рис. 2.2.2); нагрев на подложке (рис. 2.2.3); при свободном движении двухжидкостных капель в разогретой среде (рис. 2.2.4); нагрев в пламени горелки (рис. 2.2.5).

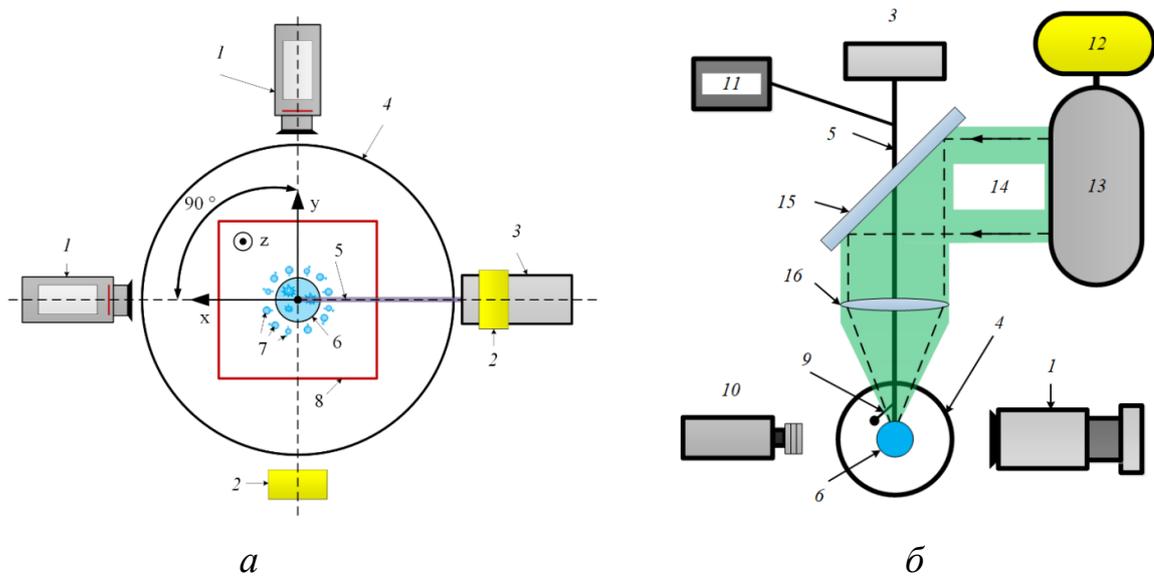


Рисунок 2.2.1 – Схематическое изображение экспериментального стенда [89] при нагреве в потоке разогретых газов (*а* – без учета лазерной подсветки; *б* – с учетом лазерной подсветки): *1* – высокоскоростная видеокамера; *2* – осветительный прожектор; *3* – моторизированное координатное устройство (МКУ); *4* – цилиндр из кварцевого стекла; *5* – держатель; *6* – двухжидкостная капля; *7* – вторичные фрагменты; *8* – регистрационная область; *9* – термопара; *10* – кросскорреляционная камера; *11* – регистратор температуры (National Instruments); *12* – лазер; *13* – оптика для формирования лазерного луча; *14* – лазерный луч; *15* – оптическое зеркало; *16* – собирающая линза.

Схема нагрева в потоке разогретых газов (рис. 2.2.1) реализована при использовании воздухонагревателя (Leister LHS 61, максимальная температура воздуха на выходе 973 К) и нагнетателя вихревого высокого давления (Leister Robust с расходом воздуха при 300 К до 1200 л/мин) с возможностью регулирования скорости потока разогретого воздуха в диапазоне от 0.5 до 5 м/с. Продолжением выходного патрубка воздухонагревателя являлся канал из кварцевого стекла (внутренний диаметр 0.1 м, толщина стенки 2 мм), в который с

использованием механизированного координатного устройства вводилась двухжидкостная капля на держателе из нихромовой проволоки диаметром 0.2 мм.

Схема нагрева в трубчатой муфельной печи (рис. 2.2.2) реализована в печи Loip LF 50/500–1200 (диапазон температур от 300 К до 1523 К), которая располагалась горизонтально.

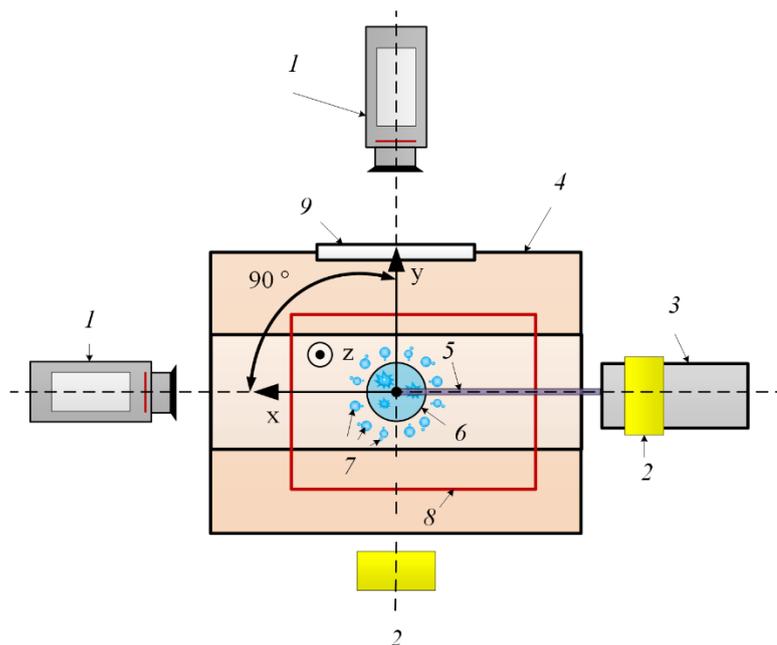


Рисунок 2.2.2 – Схематическое изображение экспериментального стенда [89] при нагреве в трубчатой муфельной печи: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – осветительный прожектор; 3 – моторизированное координатное устройство (МКУ); 4 – трубчатая муфельная печь; 5 – держатель; 6 – двухжидкостная капля; 7 – вторичные фрагменты; 8 – регистрационная область; 9 – смотровое окно.

Нагрев металлической подложки (рис. 2.2.3), на которую помещалась двухжидкостная капля, осуществляется высокочастотным индукционным нагревателем ВЧ-15АВ (мощность 15 кВт, диапазон частот 30–100 кГц). Применялась полированная подложка – цилиндрический диск из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и углублением цилиндрической формы в верхней части диаметром 5.5 мм и глубиной 2 мм.

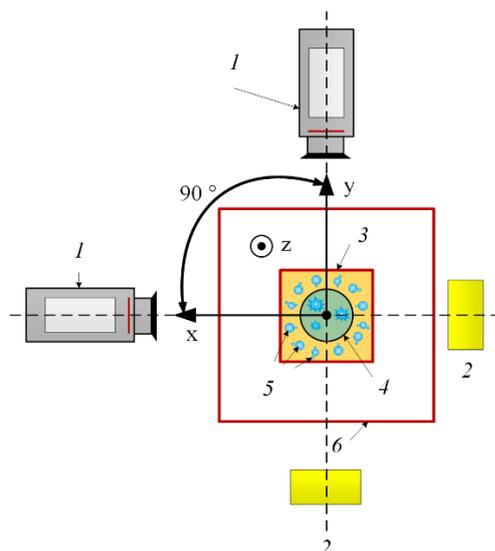


Рисунок 2.2.3 – Схематическое изображение экспериментального стенда [89] при нагреве на разогретой подложке: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – осветительный прожектор; 3 – разогретая подложка; 4 – двухжидкостная капля; 5 – вторичные фрагменты; 6 – регистрационная область.

В схеме свободного движения двухжидкостных капель в разогретой среде (рис. 2.2.4) в качестве нагревательной системы использовалась трубчатая муфельная печь Loip LF 50/500–1200 (диапазон температур от 300 К до 1523 К). Муфельная печь располагалась в вертикальном положении. Процесс фрагментации двухжидкостных капель регистрировался с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro M310 (частота съемки до 10^5 кадров в секунду). Пространство в камере муфельной печи подсвечивалось снизу с помощью светодиодного прожектора MultiLed QT projector (GS Vitec GmbH, Германия).

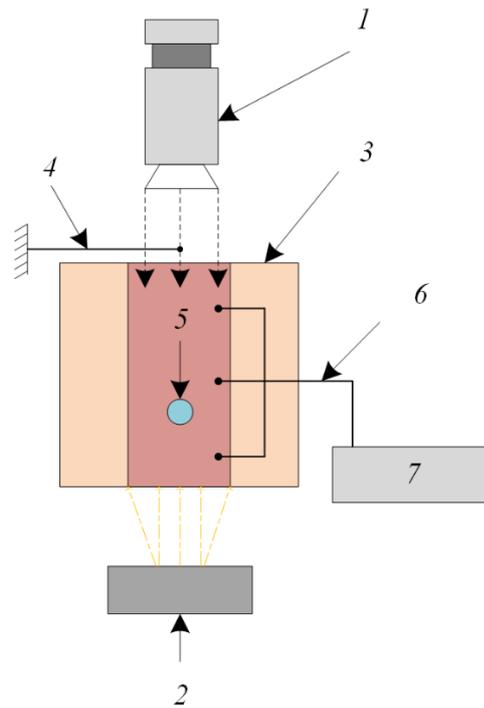


Рисунок 2.2.4 – Схематическое изображение стенда [87], используемого при проведении исследований свободного движения двухжидкостных капель в разогретой среде: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – осветительный прожектор; 3 – трубчатая муфельная печь; 4 – держатель; 5 – двухжидкостная капля; 6 – термопара; 7 – регистратор температуры (National Instruments).

Для создания высокотемпературной пламенной зоны (рис. 2.2.5) применялось горелочное устройство со спиртом (тип топлива – этиловый спирт, максимальная температура 1120 К) и с пропан-бутановой смесью (24.4 % пропан, 56.4% бутан и 17.2% изобутан, максимальная температура 1450 К). Выбор горелочных устройств со спиртом и пропан-бутановой смесью обусловлен тем, что возникают разные по абсолютной величине температуры пламени. Максимальная температура в пламени спирта достигала 1120 К, в пламени пропан-бутановой смеси – 1450 К. Контроль температуры в пламени осуществлялся 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. Для калибровки системы температура

пламени измерялась в нескольких сечениях на разном расстоянии от горелочного устройства с варьируемым шагом до 0.5 см.

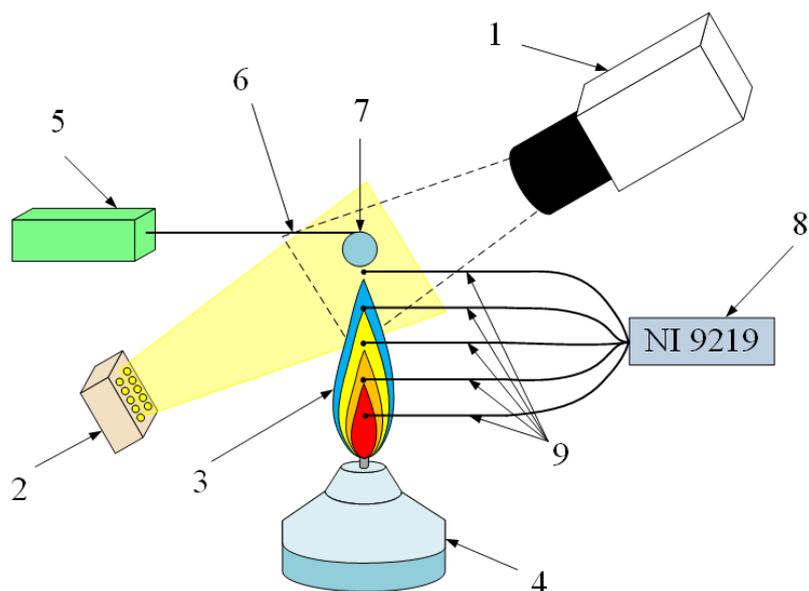


Рисунок 2.2.5 – Схематическое изображение экспериментального стенда при нагреве в высокотемпературной пламенной зоне: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – осветительный прожектор; 3 – пламя; 4 – горелочное устройство; 5 – моторизированное координатное устройство (МКУ); 6 – держатель; 7 – двухжидкостная капля; 8 – регистратор температуры (National Instruments); 9 – термопары.

2.3 Технологии формирования капель

Для генерации двухжидкостных капель использовались два электронных дозатора Finnpipette 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). На первом этапе формировалась капля воды заданного объема и подвешивалась на держатель. Далее формировалась капля горючего вещества (топлива), которая растекалась по поверхности капли воды, образуя на ее поверхности пленку толщиной 0.05–0.5 мм. Толщина пленки топлива зависела от генерируемого объема капли и

соотношения концентраций жидкостей. Метод Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) использовался для определения толщины пленки горючей жидкости. Rhodamine B концентрацией 10000 мкг/л добавлялся в воду и подсвечивался лучом лазера как в [88]. Выбор такой схемы формирования двухжидкостных капель («вода/топливо») обусловлен тем, что в технологиях сжигания эмульгированных топлив капельки воды зачастую растворены в объеме горючей жидкости и объединяются в одну общую каплю в процессе нагрева [130]. Для этих же технологий типично использование двух форсуночных устройств при раздельном впрыске горючей и негорючей жидкости, которые перемешиваются непосредственно в камере сгорания.

В качестве держателя капель (как двухжидкостных, так и эмульсий) применялась нихромовая проволока диаметром 0.2 мм. По сравнению с другими материалами (керамика, фосфор, железо, сталь и др.) [77], а также схемами закрепления капель на держателе нихромовая проволока оказывала наименьшее влияние на прогрев, испарение и фрагментацию исследованных капель. Соответствующие оценки выполнены в [77] за счет сравнения экспериментальных и теоретических результатов исследований.

На рис. 2.3.1 показана условная схема получения двухжидкостной капли. Начальный объем двухжидкостной капли в экспериментах варьировался в диапазоне $V_d=0.5-15$ мкл. Это соответствовало диапазону изменения радиуса $R_d=0.5-1.53$ мм. Получение двухжидкостных капель меньшего размера сложно осуществить вследствие ограничений по минимальному дозируемому объему (не менее 0.5 мкл) в электронном дозаторе. Капли большего объема (более 15 мкл) срывались с держателя еще до помещения в нагревательную камеру.

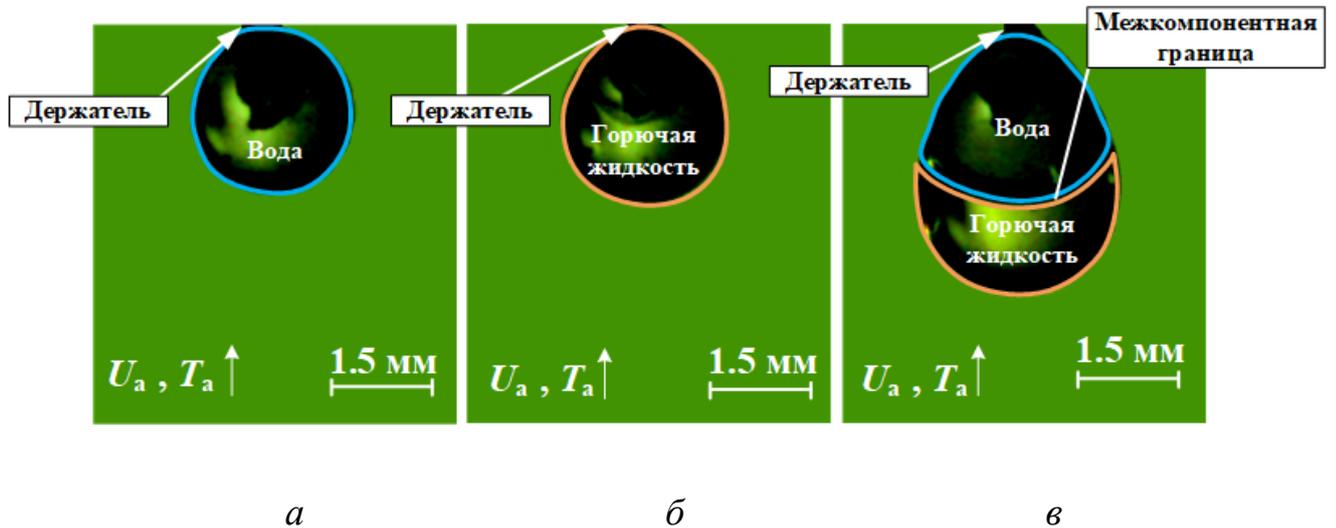
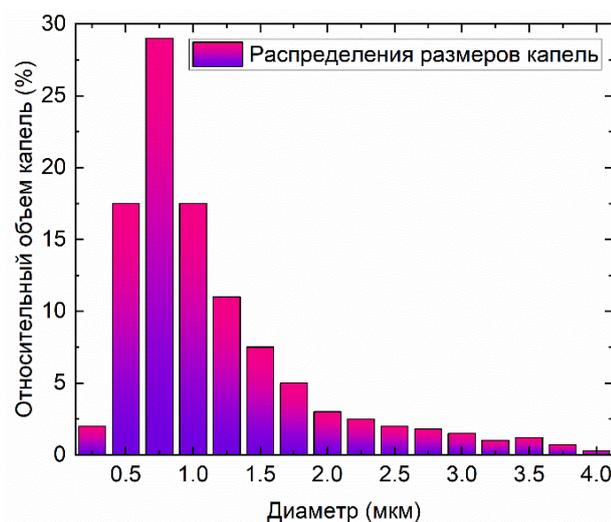
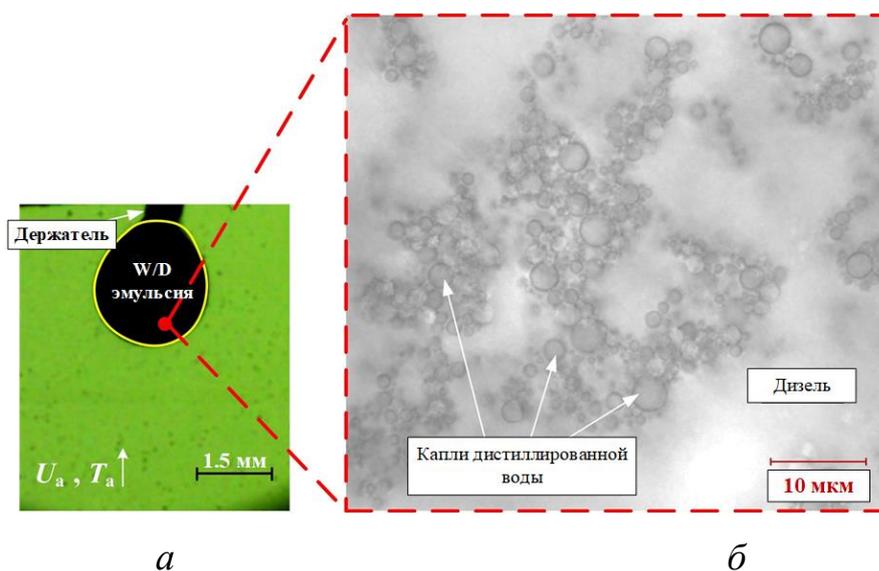


Рисунок 2.3.1 – Внешний вид исходных капель воды (а) и горючей жидкости (топлива) (б), а также типичной двухжидкостной капли с индикацией границы раздела «вода/топливо» (в) [76].

Смешивание компонентов эмульсий осуществлялось в ультразвуковой ванне «Сапфир 2.8». На начальном этапе к горючему веществу (топливу) добавлялся эмульгатор с требуемой концентрацией [131], после чего состав перемешивался в течение 5 минут. Затем к полученному составу добавлялась требуемая концентрация воды, эмульсия смешивалась в течение 5 минут. Размер дисперсной фазы (капелек воды) в полученной эмульсии составил 1-5 мкм. Капельный тест использовался для проверки стабильности и однородности эмульсии. Для формирования капель эмульсии заданного объема на держателе использовался электронный дозатор. На рис. 2.3.2 (а) приведены кадры с изображением капли типичной приготовленной водо-дизельной эмульсии. Изображение на рис. 2.3.2 (б) получено методом LSCM (Laser Scanning Confocal Microscopy) с помощью микроскопа ZEISS LSM 780 NLO в режиме T-PMT (transmission light) с использованием лазерной линии 405 нм. На рис. 2.3.2 (в) приведено распределение размеров капель дисперсной фазы в тестируемом образце водо-дизельной эмульсии. Размеры капель эмульсии были рассчитаны с использованием программы Image J (Wayne Rasband, National Institutes of Health). В исследуемой эмульсии наиболее представлены капли воды с диаметром 0.8–0.9

мкм. Средний диаметр капель составляет 1.2 мкм. Полученный средний размер капель дисперсной фазы хорошо коррелирует с аналогичным параметром в известных исследованиях явления микро-взрывной фрагментации в каплях вододизельных эмульсий [52,132]. Вододизельные эмульсии с такими средними размерами капель воды считаются тонкодисперсными [132], но не самыми эффективными с точки зрения последствий фрагментации капли, вызванной микро-взрывным дроблением [52].



в

Рисунок 2.3.2 – Капля типичной приготовленной вододизельной эмульсии (*а*); LSCM изображения тестируемой эмульсии лазером 405 нм (объемная концентрация водной фазы 30 %, массовая концентрация эмульгатора – 3 %) (*б*); распределения капель воды в тестируемой вододизельной эмульсии (*в*) [76].

В экспериментах использовались типичные для топливных технологий, а также термической и огневой очистки жидкостей от нерегламентированных примесей вещества (табл. 2.3.1): вода, керосин (ТС-1), дизельное топливо (н-додекан), рапсовое масло (метилолеат), трансформаторное масло. В табл. 2.3.1 приведены данные по свойствам горючих и негорючих жидкостей, использованных в проведенных экспериментах, при 293 К [133]. Они использовались в последующем анализе возможных изменений результатов опытов в случае применения соответствующих горючих и негорючих жидкостей из разных регионов мира.

Таблица 2.3.1 – Свойства горючих и негорючих жидкостей (на основе данных [133] при 293 К), использованных в проведенных экспериментах.

Жидкости	Свойства							
	k_1 , Вт/(м·К)	C_1 , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	κ , мм ² /с	μ , мПа·с	σ , Н/м	T_b , К	L , МДж/кг
Дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72)	0.599	4182	998.2	0.144	1.004	0.072	373.15	2.368
Керосин (ТС-1)	0.133	2209	727.1	0.0828	0.814	0.023	447.3	0.372
Дизельное топливо (н-додекан)	0.137	2215	743.7	0.0832	1.314	0.025	489.5	0.354
Рапсовое масло (метилолеат)	0.115	2111	868.9	0.0627	4.737	0.031	617	0.338
Трансформаторное масло	0.115	2000	865	0.0665	2.509	0.029	623	0.209

2.4 Методы экспериментальных исследований процессов микро-взрывной фрагментации

Высокоскоростная съёмка использовалась для регистрации процессов прогрева, испарения и микро-взрывного распада капель. Полученные видеозаписи обрабатывались с использованием программных комплексов Actual Flow, Phantom Camera Control и собственных алгоритмов обработки в Matlab и Mathematica. В ходе обработки определялись времена задержки микро-взрывного распада,

времена существования, начальный размер каплей R_{d0} , размеры и число вторичных фрагментов N_{cd} и r_{cd} , суммарная площадь поверхности испарения жидкости после S_1 и до S_0 микро-взрывного распада (рис. 2.4.1).

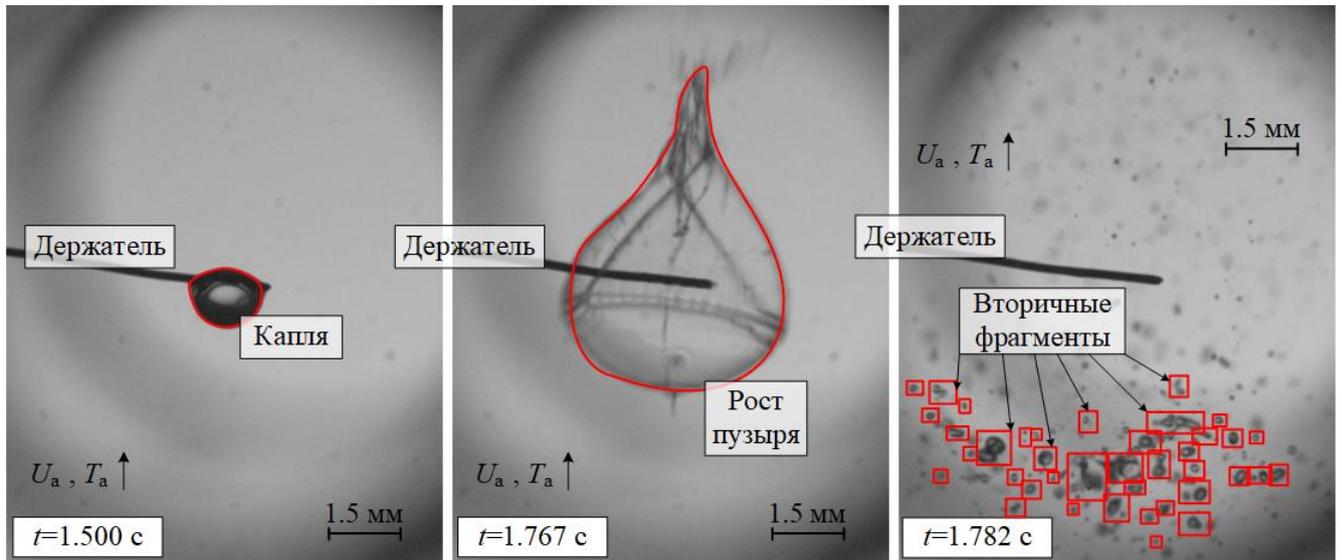


Рисунок 2.4.1 – Схема регистрации процесса микро-взрывного распада [86] нагреваемой двухжидкостной капли (вода/рапсовое масло) и образования аэрозольного облака ($R_{d0} \approx 0.85$ мм, $T_a \approx 650$ К, объемная концентрация воды 10 %).

Анализ числа и размеров вторичных фрагментов (рис. 2.4.1) осуществлялся с использованием метода Shadow Photography (SP) по видеокадрам, полученным с помощью высокоскоростной съемки. Метод SP основан на анализе теневых изображений. Для вычисления числа (N_{cd}) и размеров (r_{cd}) вторичных фрагментов по методу SP применялись три подхода с целью повышения точности результатов экспериментов и оценки их воспроизводимости в серии опытов. Расхождения результатов измерений не превышали 5 %. Этот результат очень важен, так как он позволяет сделать вывод о применимости любого из трех подходов в подобных сериях опытов. Первый подход заключался в использовании авторского программного кода, написанного в Mathematica. Его основные фрагменты и соответствующие пояснения приведены в [134]. На полученных в ходе экспериментов видеокадрах определялись моменты распада исходных двухжидкостных капель с образованием вторичных фрагментов, которые затем

конвертировались в формат tiff-image и загружались в Mathematica. Программа для анализа последствий микро-взрывного распада двухжидкостных капель состояла из двух частей: 1 – поиск порога бинаризации; 2 – основной обработчик (выделение элементов, вычисление их количества и размеров с учетом масштабного коэффициента). В рамках каждой части реализовывалось вычитание фона. С помощью главных функций основного обработчика (Morphological Binarize и Median filter) осуществлялось выделение темных контрастных объектов – вторичных фрагментов на светлом фоне. Каждый ограниченный объект представлялся в виде сферической капли, имеющей размер ограниченного объекта. Далее происходило вычисление количества жидкостных фрагментов и определение размеров, выделенных вторичных капель. Погрешности определения размеров вторичных капель с использованием первого подхода не превышали 4%. Кроме собственного алгоритма обработки для изучения последствий распада использовалась реализация метода SP в программном комплексе Actual Flow [29]. Полученные в ходе экспериментов видеокadres преобразовывались в отдельные изображения. Затем выбирались видеокadres с иллюстрацией процесса образования вторичных капель. Далее изображения обрабатывались при выполнении нескольких последовательных действий. На первом этапе использовалась низкочастотная фильтрация, которая позволяла уменьшить уровень шумов. На втором этапе проводилась бинаризация изображений, полученных на предыдущем этапе обработки (использовался высокочастотный фильтр Лапласа). На третьем этапе обработки совершался поиск односвязных областей по бинаризованному изображению. В итоге для каждого изображения создавалось нерегулярное поле данных, содержащее координаты центров капель и их радиусы. Дополнительно на последнем этапе осуществлялось исключение частиц, образованных бликами от капель [89]. Максимальная погрешность вычисления размеров вторичных капель методом SP в Actual Flow составила около 3 % относительных средних значений радиусов в серии опытов.

Для расчета числа (N_{cd}) и размеров (r_{cd}) вторичных капель также применялся код, разработанный в системе Matlab. Данный код позволял определять не только число и размеры вторичных фрагментов, но и значения минимального, максимального и среднего размера вторичных капель, минимальной, максимальной и средней скорости движения вторичных фрагментов, минимальной, максимальной и средней кинетической энергии вторичных фрагментов жидкости, площадь поверхности испарения после и до распада [135]. На исходных видеокадрах, полученных в ходе экспериментов, определялись моменты, когда исходные капли распадались с образованием вторичных фрагментов. Сохранялись два последовательных кадра с «паффингом»/микровзрывом, которые затем преобразовывались в формат изображения tiff и загружались в программный комплекс Matlab. В процессе обработки совершался поиск односвязных областей по бинаризованному изображению. В итоге для каждого изображения создавалось нерегулярное поле данных, содержащее координаты центров капель и их размеры (радиусы) аналогично методу SP в Actual Flow. Затем выбиралась прямоугольная область регистрации вторичных капель, в пределах которой осуществлялся поиск вторичных капель. Возможность выбора определенной области регистрации вторичных фрагментов позволяла определить характеристики вторичных фрагментов для каждой из капель в тандеме. Максимальная погрешность вычисления характеристик вторичных капель в программном комплексе Matlab не превышала 3 % относительных результатов, полученных другими методами.

Важный этап анализа видеокадров при применении выше упомянутых подходов состоял не только в бинаризации изображений, но и определении глубины резкости объектива. Это позволяло оценивать число капель, непосредственно попадающих в глубину резкости и располагающихся за ее пределами. Для учета вторичных фрагментов, выходящих за глубину резкости объектива, выполнялись дополнительные эксперименты с варьированием последней и рассчитывались корректирующие коэффициенты, на которые

домножались значения количества и размеров вторичных фрагментов. Для всех экспериментов проводилась ручная фокусировка при помощи Multi-Function Calibration Target. При помощи такой мишени определялась глубина резкости объектива. Для этого мишень устанавливалась в области регистрации. Настраивался фокус в ручном режиме на нулевую отметку. Затем измерялось расстояние до следующей видимой метки на мишени. Это расстояние и являлось глубиной резкости. Таким же образом определялся масштабный коэффициент. Координатная сетка выбиралась таким образом, чтобы масштабный коэффициент был в 3 раза меньше характерного размера капли. Не менее 3 пикселей соответствовало самым мелким каплям, образующимся при микро-взрывном дроблении исходных капель. Размеры области регистрации варьировались от 10x10 мм до 15x15 мм.

Для оценки эффективности измельчения рассчитывалось отношение площади свободной поверхности капель после взаимодействия (вторичные фрагменты) ($S_1=4\cdot\pi\cdot N_{cd}\cdot r_{cd_av}^2$) и до ($S_0=4\cdot\pi\cdot R_{d0}^2$). Так как при взаимодействии капель не все образованные вторичные фрагменты попадали в область регистрации, то рассчитывались объёмы капель после взаимодействия ($V_{cd}=4/3\cdot\pi\cdot N_{cd}\cdot r_{cd_av}^3$) и до ($V_{d0}=4/3\cdot\pi\cdot R_{d0}^3$). Число вторичных фрагментов увеличивалось пропорционально их размеру для выполнения условия $V_{d0}=V_{cd}$. Итоговое отношение площадей поверхности испарения после и до микро-взрывной фрагментации определялось с учетом выражения:

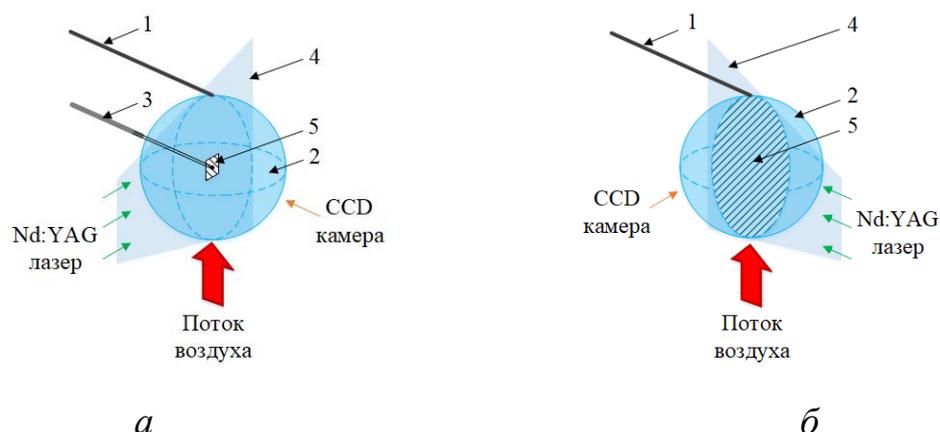
$$S_1 / S_0 = (N_{cd} \cdot 4\pi r_{cd_av}^2) / (4\pi R_{d0}^2) = \frac{N_{cd} \cdot r_{cd_av}^2}{R_{d0}^2} = \frac{4 / 3\pi R_{d0}^3 r_{cd_av}^2}{4 / 3\pi r_{cd_av}^3 R_{d0}^2} = \frac{R_{d0}}{r_{cd_av}}.$$

Метод Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) применялся для измерения температуры воды в исследуемых двухжидкостных каплях. В состав комплекса по измерению температуры методом PLIF входили: кросскорреляционная видеокамера, макрообъектив, светофильтр для нейтрализации избыточного лазерного излучения, флуоресцентный краситель, двойной импульсный лазер, объектив для формирования лазерного ножа с варьируемым углом раскрытия,

персональный компьютер с программным комплексом Actual Flow и модулем PLIF Kit. В экспериментах в качестве флуорофора использовался Rhodamine B (по аналогии с [136]). Это обусловлено тем, что данный краситель имеет плохую растворимость в типичных нефтепродуктах и горючих жидкостях, в отличие от, например, Pyromethene 597-C8 [136]. Это в свою очередь позволяло проводить регистрацию температурного распределения вблизи границы «вода (с примесью Rhodamine B) / топливо».

В процессе проведения эксперимента капля рассекалась по оси симметрии (через центр масс) лучом импульсного лазера с частотой 4–10 Гц. Частота изменялась в соответствии с условиями проведения эксперимента. Полученные видеок cadры с изображением капли регистрировались CCD видеокамерой и обрабатывались с применением программного комплекса Actual Flow. Толщина лазерного ножа составляла 100 мкм. Таким образом, обеспечивалась минимальная постоянная плотность лазерного излучения в измерительной области.

Эксперименты включали два этапа (рис. 2.4.2). Первый – температурная калибровка измерительной системы с применением малоинерционной термопары и капли воды без дополнительных примесей. Второй – регистрация температурного поля испаряющейся и фрагментирующей двухжидкостной капли при варьировании температуры воздуха. Основные процедуры на примере капель воды подробно описаны при выполнении опытов [136]. Ниже представлено краткое описание с учетом характерных исследованным объектам особенностей.



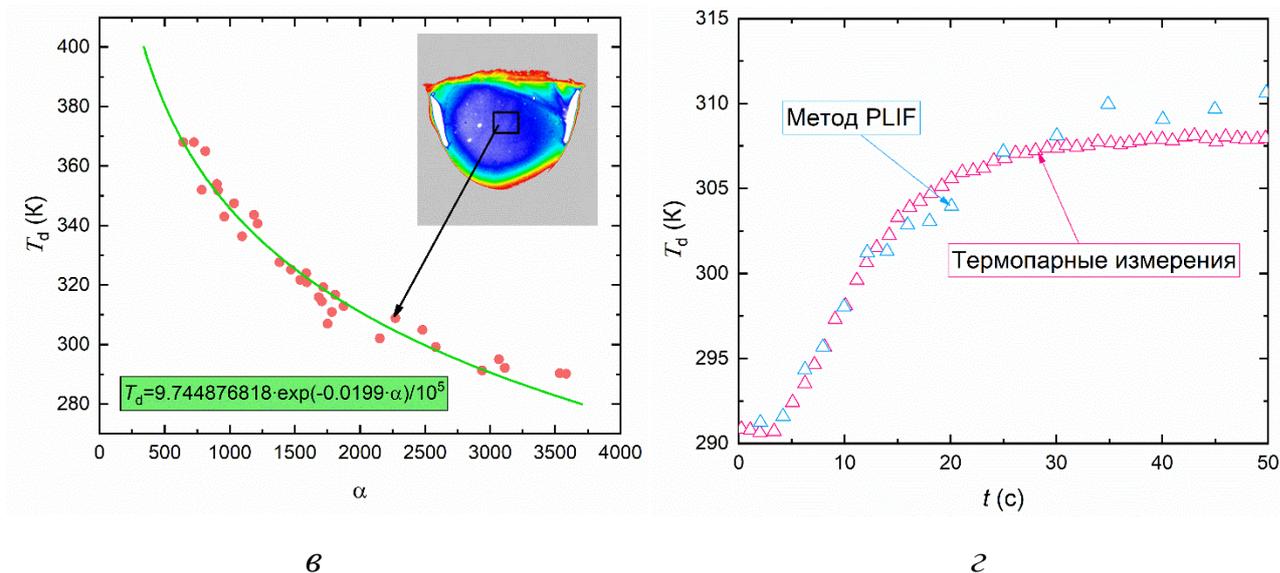


Рисунок 2.4.2 – Схема применения метода PLIF на этапе калибровки системы (а) и в процессе проведения эксперимента (б): 1 – держатель; 2 – капля; 3 – малоинерционная термопара; 4 – лазерный нож; 5 – область видеорегистрации; экспериментальная калибровочная кривая (в) и результаты сопоставления температур в центре капли (при $V_d \approx 10$ мкл, $R_d \approx 1.53$ мм, $U_a \approx 3$ м/с, $T_a \approx 373$ К), полученных при применении метода PLIF и миниатюрной термопары (г) [106].

Первый этап заключался в получении библиотеки изображений при заданных постоянных во всей измерительной области (во всем объеме капли) температурах воды. Измерения проводились не менее чем для 20–30 значений температур газов в диапазоне от 300 К до 823 К с целью получения калибровочной кривой при удовлетворительной точности. Отклонения температур в регистрационной области не превышали погрешностей задействованных при калибровке термопар в идентичных условиях нагрева. Полученная в экспериментах калибровочная кривая представляла зависимость температуры от светимости флуорофора Rhodamine В в единицах яркости. Для калибровки системы в каплю вводилась миниатюрная малоинерционная термопара (платина-платинородиевая, диаметр спая 0.05 мм, инерционность 0.1 с) таким образом, чтобы ее спай размещался в центре масс капли воды. Капля с размещенной в ней миниатюрной термопарой вводилась в кварцевый канал с

потоком разогретого воздуха. Температурное поле капли $T_d(R_d, t)$ изменялось при варьировании температуры T_a . Спай термопары перемещался в капле моторизованным механизмом для регистрации температуры воды T_d в разных точках сечения нагреваемой капли. Таким образом, регистрировались зависимости $T_d=f(T_a)$. Для каждой температуры T_a регистрировалось не менее 100 изображений капли в соответствии с рекомендациями разработчиков метода PLIF. Полученные изображения с соответствующими полями светимости усреднялись. С усредненных изображений капли воды удалялись шумы. С использованием результатов обработки видеокладов процедурой PLIF Calibration и данных термопарных измерений строилась калибровочная кривая. При этом для большей точности в ходе обработки выбиралась малая область (0.5×0.5 мм) в сечении капли, находящаяся в окрестностях спая термопары. Термопарой также регистрировались 100 значений T_d в идентичных сечениях при соответствующих временах нагрева.

На втором этапе проводилась видеорегистрация процессов прогрева, испарения и микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель при неизменных параметрах работы лазера и камеры, измерительной области, фоновой подсветки, взаимного расположения устройств и рабочего участка. После завершения экспериментов полученные изображения обрабатывались с использованием Actual Flow software. Применялась процедура PLIF Reconstruction с использованием полученной на первом этапе калибровочной кривой. Определялись поля температур в сечениях капли, получаемых при рассекании последней лазерным ножом.

Для идентичных начальных условий проводились от 3 до 5 экспериментальных серий. Каждая серия включала от 100 до 1000 видеокладов с изображением капли в процессе прогрева, испарения и фрагментации (в течение всего времени существования). Процесс видеорегистрации при этом начинался в момент размещения двухжидкостных капель по центру цилиндрического кварцевого канала и завершался по окончанию процесса фрагментации

последней. Систематическая погрешность определения температуры воды в двухжидкостных каплях T_d с использованием разработанного подхода не превышала 2–3 К.

Метод Laser Induced Phosphorescence (LIP) использовался для измерения температуры горючих жидкостей. Метод лазерной индуцированной фосфоресценции [137–139] основан на регистрации излучения частиц – люминофоров специализированными CCD видеокамерами с набором фильтров. В общем случае метод LIP базируется на том, что излучение люминофоров (частиц ВАМ:Eu) зависит от температуры. Для возбуждения люминофора использовался ND:YAG лазер Quantel Q-smart 450, работающий на третьей гармонике (длина волны 355 нм, частота повторения 10 Гц, максимальная энергия в импульсе 130 мДж) с импульсом длительностью 25 нс и энергией в импульсе 1.3 мДж при частоте 3 кГц. При этом генерировался луч высокой освещенности.

Особенностью метода LIP является использование одновременно двух высокочувствительных CCD видеокамер Imager M-lite 2M (разрешение кадра 1920x1280 пикселей, частота съемки 10 кадров в секунду, разрядность 12 бит) с объективами Nikon 200mm f/4 AF-D Macro, оснащенными комплектом светофильтров и набором цилиндрических линз. Продолжительность измерений определяется временем распада люминофора. Для используемого люминофора ВАМ:Eu продолжительность при комнатной температуре равна примерно 1 люмен в секунду и уменьшается с ростом температуры. Для разделения и фильтрования двух каналов применялся светоделитель (цветность T445LP) в комбинации с двумя интерференционными фильтрами (Edmund Optics 466 нм, цветность 420 нм). Использование блока сведения (светоделителя) позволяло минимизировать относительное искажение и различия изображений с различных CCD видеокамер.

Полученные изображения обрабатывались специальными алгоритмами на основе программного обеспечения DaVis (рис. 2.4.3):

1. Вычитание шумов – проводилось с помощью регистрации области без капли (процесс Image Arithmetic).
2. Пространственная калибровка (совмещение изображений капли с первой и второй видеокамеры) (процесс Image Correction).
3. Сжатие каждого изображения в паре, в результате чего начальное разрешение (1920×1280 пикселей) кадров уменьшалось в два раза (до 960×640 пикселей). Этот шаг позволял выполнить первичную обработку изображений капли (процесс Compress and Expand).
4. Наложение алгоритмической маски. В ходе данного процесса задавалась пороговая интенсивность свечения кадра. Так как эмитированный свет регистрировался только на изображении капли (за ее пределами частицы ВМ:Eu отсутствовали), то порог интенсивности определялся как минимальная светимость капли на первом кадре (420 нм). Всей области за пределами капли присваивалось значение светимости $\alpha=0$ (процесс Algorithmic Mask).
5. Линейная фильтрация каждого изображения из пары посредством сглаживания (процесс 9×9 Smoothing Filter).
6. Поиск отношения светимостей каждой точки (пикселя) в паре кадров – Ratio (420/455 нм). В результате получалось одно изображение капли в каждый момент времени. Светимость каждой точки представляло собой функцию от температуры жидкости (процесс Two Color LIF).
7. Пересчет светимости изображений, полученных на предыдущем шаге, в температуру с использованием уравнения калибровочной кривой. Получалось двумерное температурное поле капли (процесс LIF Temperature).
8. Сглаживание полученного температурного поля для получения равномерной картины (процесс 5×5 Smoothing Filter).

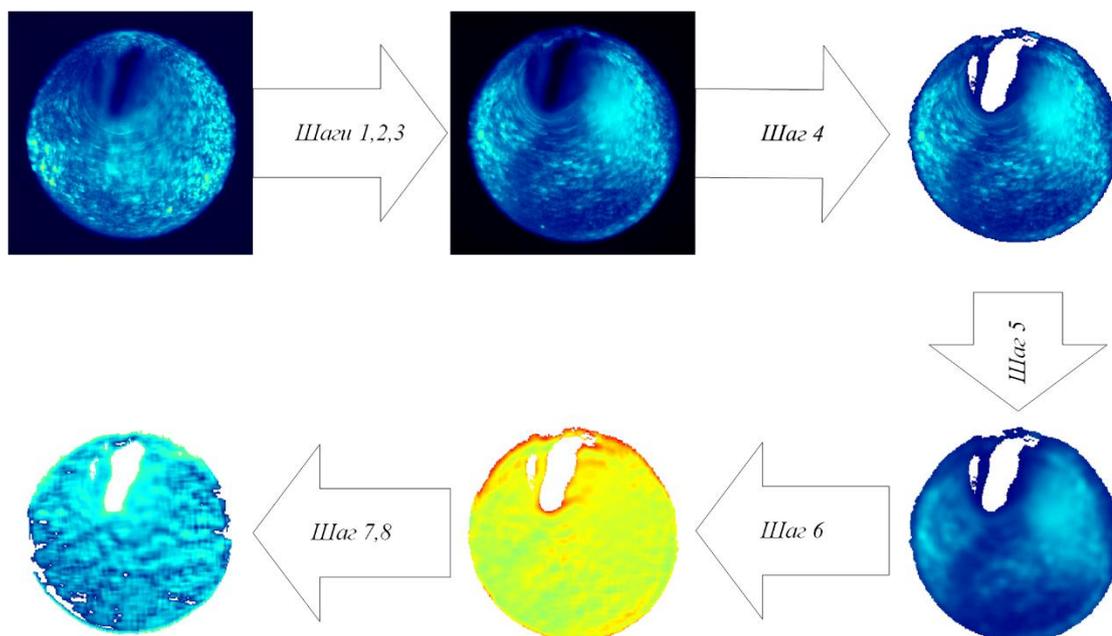


Рисунок 2.4.3 – Схема обработки изображений по результатам регистрации температуры горячей жидкости [140].

Для калибровки (определения соотношения отфильтрованных изображений и текущей температуры) измерительной системы и последующего вычисления калибровочной зависимости использовались малоинерционные термоэлектрические преобразователи. Термопары помещались в плоскость измерения во время устойчивой работы лазера. Регистрировались серии изображений при различных температурах измерительной (регистрационной) области. Показания термопар сопоставлялись с коэффициентом интенсивности излучения. Затем, используя программный модуль LIP Calibration, строилась калибровочная зависимость температуры от интенсивности свечения люминофора.

Метод Particle Image Velocimetry (PIV) применялся для контроля скоростей движения потока воздуха (U_a) в цилиндрическом канале. Использовались импульсный твердотельный лазер, генератор лазерного излучения, кросскорреляционная камера и синхронизатор лазера, камеры и ПК. Для обработки полученных результатов при PIV-съемке использовалось программное обеспечение Actual Flow. Трассирующие частицы (диоксид титана TiO_2)

вводились в поток высокотемпературных газов в нижней части цилиндра (аналогично методике [141]).

Метод Micro Particle Image Velocimetry (Micro PIV) применялся для измерения скоростей термогравитационной конвекции в двухжидкостных каплях. Данный метод предусматривал применение трассирующих частиц – диоксида титана размерами около 1 мкм. Данные частицы насыпались в емкость с жидкостью и перемешивались. Оптимальная концентрация трассирующих частиц определялась эмпирически и не превышала 0.08 г/л. Это позволяло обеспечить достаточную степень засева капли частицами и, как следствие, хорошую повторяемость результатов измерений. Анализ последних показал, что максимальные систематические и случайные погрешности определения скорости конвекции в каплях воды не превышали 3 % от среднего значения регистрируемого параметра в каждой серии опытов. По результатам сопоставления значений скорости термогравитационной конвекции в начальный момент времени регистрации и текущий момент времени рассчитывались изменения средних скоростей конвекции (аналогично методике [142]) δU относительно начальных значений. Регистрация скоростей термогравитационной конвекции в каплях предусматривала несколько процедур измерений и несколько этапов, которые отличались расположением исследованной капли в кадре (фронтальное изображение и сбоку) для учета влияния схемы помещения объекта исследований в поток разогретого воздуха. При реализации Micro PIV измерений в капле использовался Nd:YAG лазер Qantel “Evergreen 70”, CCD видеокамера ImperX “IGV B2020M”, макрообъектив Navitar с комплектом линз. Настройки системы: разрешение кадра 2048×2048 пикселей, межкадровая задержка 250 мс, задержка между кадрами в паре 11 мс.

2.5 Варьируемые и регистрируемые параметры

В табл. 2.5.1 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 исследованных капель.

Таблица 2.5.1 – 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

2.6 Неопределенности измерений

В рамках диссертационной работы 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 таблице 2.6.1 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.

Таблица 2.6.1 – 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 термопар типа К	$\pm 3 \text{ K} (\pm 0.1 \text{ c})$
	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)	$\pm 1.5\text{--}2 \text{ K}$
Микро-взрывная фрагментация капель	Времена задержки микро-взрывного распада (τ_p) Времена существования (τ_{fill}) 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 (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.).

2.7 Результаты экспериментов и их обсуждение

На рисунке 2.7.1 приведены типичные видеокадры с иллюстрацией установленных режимов прогрева, теплового расширения, испарения, «паффинг» и микро-взрывного распада топливных эмульсий. Каждый из вариантов последствий характеризовался рядом особенностей. Так, например, для режима монотонного испарения характерным было, что капля интенсивно прогревалась и испарялась без отрыва вторичных фрагментов (рис. 2.7.1а). Для режима «паффинг» процессы зарождения пузырьков реализовывались не по всему объему, а в основном локально (рис. 2.7.1б). Разрушение (схлопывание) пузырьков сопровождалось отрывом отдельных частей капли. При увеличении температуры газа, либо увеличении концентрации горючей жидкости реализовывался режим микро-взрывного распада, характеризующийся интенсивным формированием пузырей во всем объеме. На начальном этапе капля прогревалась, никаких изменений с поверхностью капли практически не происходило, а затем регистрировался громкий хлопок, характеризующийся мгновенным дроблением капли. Образовывался мелкодисперсный аэрозоль с четко детектируемыми парами. Наличие последних можно было регистрировать как визуально за счет применения высокоскоростной видеокамеры, так и явно выраженного тумана (смога).

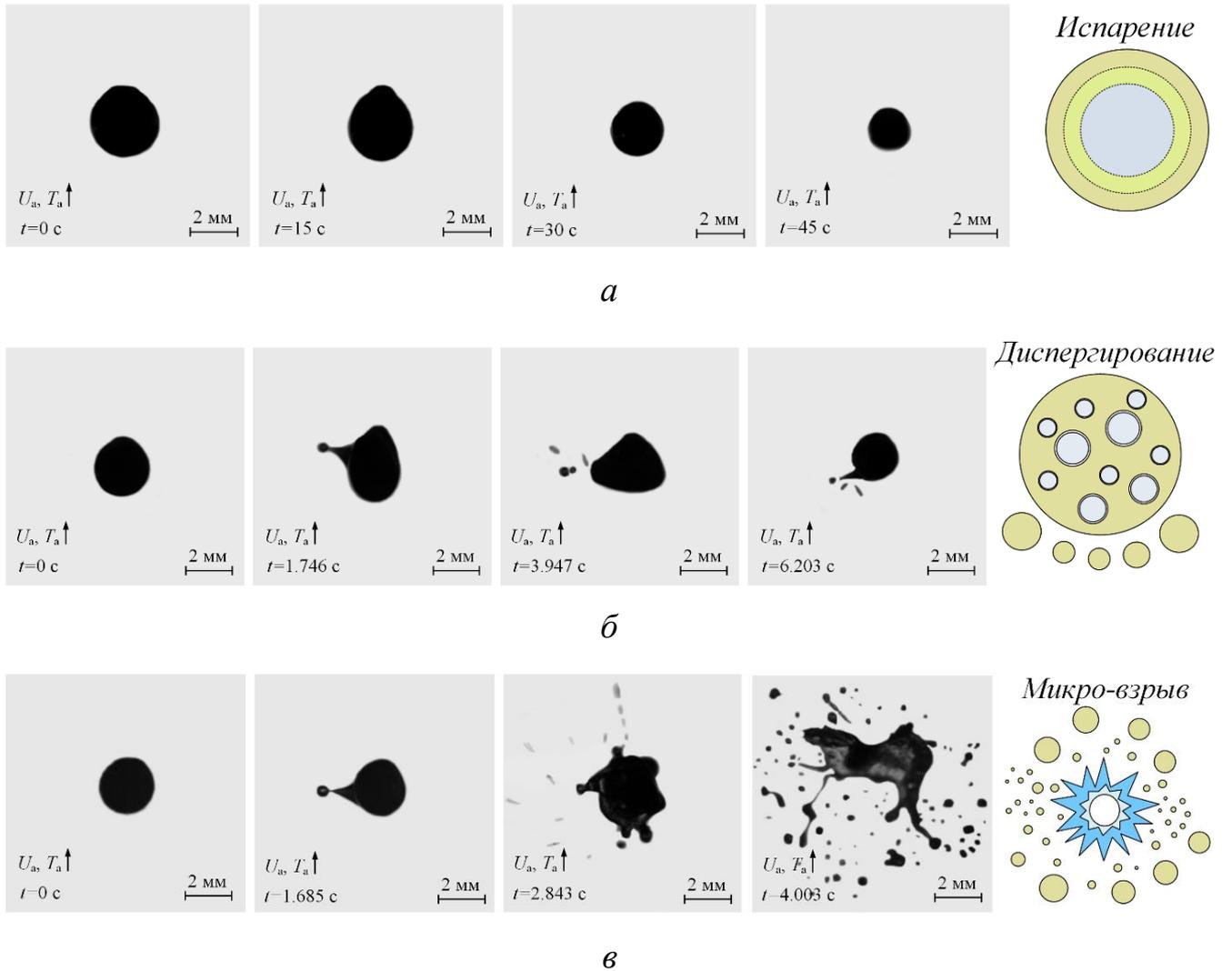


Рисунок 2.7.1 – Видеокадры и схемы режимов прогрева, расширения, испарения, «паффинг» и микро-взрывного распада капель топливных эмульсий ($U_a \approx 3$ м/с, $R_{d0} \approx 1.21$ мм, $\eta_f \approx 90$ %): *a* – испарение ($T_a \approx 473$ К), *б* – диспергирование («паффинг») ($T_a \approx 573$ К), *в* – микро-взрывная фрагментация ($T_a \approx 673$ К).

На рисунке 2.7.2 выделены температурные диапазоны реализации установленных различных вариантов последствий прогрева, испарения, «паффинг» и микро-взрывного распада двухжидкостных капель (в соответствии с видеокадрами рис. 2.7.2). Переходные области между соответствующими вариантами последствий обозначены штриховкой. На этих участках регистрировались два соответствующих варианта с равной повторяемостью.

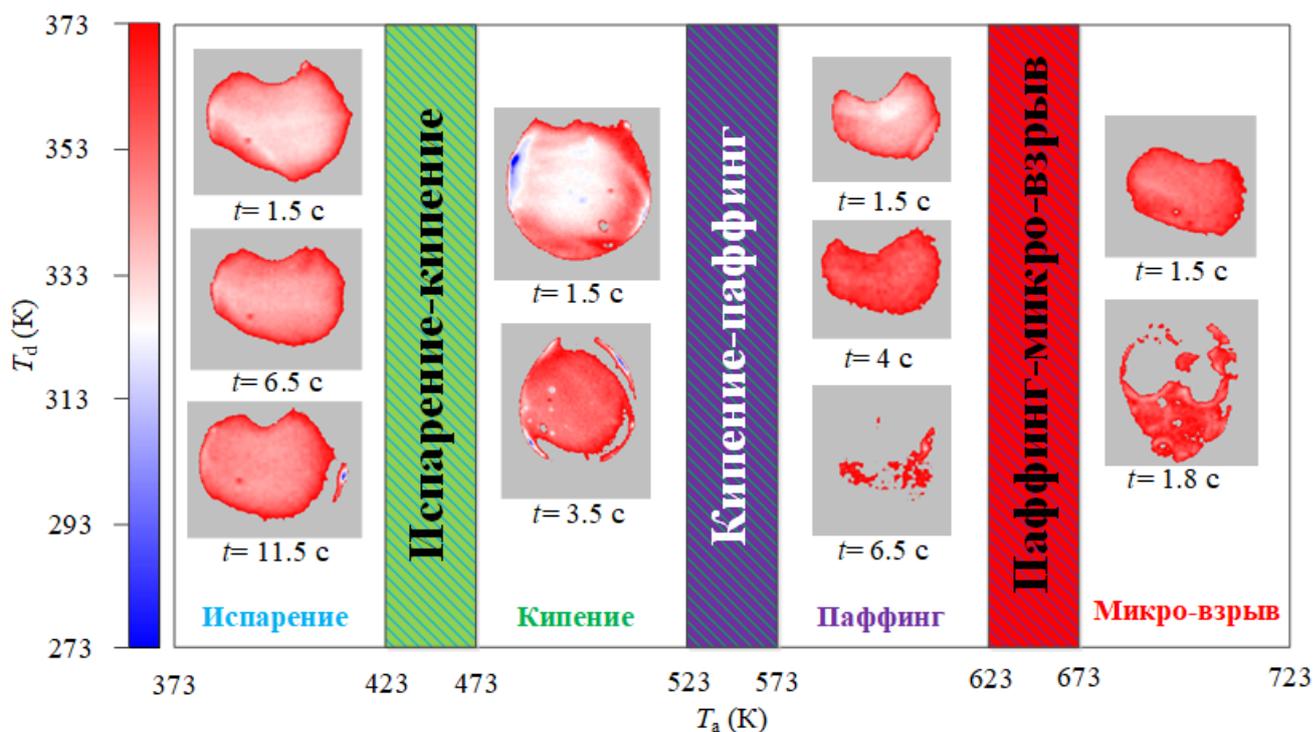


Рисунок 2.7.2 – Температурные диапазоны с разными режимами микро-взрывного распада двухжидкостных капель (95 % дистиллированная вода / 5 % керосин, $V_d \approx 15$ мкл, $U_a \approx 2$ м/с) и иллюстрацией типичных температурных полей капель T_d .

Анализ температурных полей двухжидкостных капель, полученных методом PLIF, позволил установить основной физический механизм реализации процессов микро-взрывного распада двухжидкостных капель. Он основан на следующих закономерностях. Зарегистрировано, что перед непосредственным микро-взрывным распадом двухжидкостных капель температура воды локально (на границе раздела «вода/топливо») достигала температуры кипения, т.е. 373.15 К. На границе раздела «вода/топливо» температура могла достигать 383–393 К. Этот результат иллюстрирует эффект образования перегрева на границе раздела «вода/топливо», который и приводит к процессам «паффинг» и микро-взрывной фрагментации. При этом на рис. 2.7.2 видно, что двухжидкостная капля может прогреться по всему объему до температуры 353–363 К, монотонно испариться и не измельчиться (т.е. сохранить свою целостность). Именно локальный перегрев воды в двухжидкостных каплях (приводит к цепной активации

низкотемпературных центров генерирования импульсов давления [83,84]) являлся основной причиной их разрушения (с соответствующими звуковыми (хлопок) и визуальными (фрагментация) эффектами, сопровождающимися получением мелкодисперсного аэрозоля и парового тумана).

Предварительно выполненный анализ показал, что определяющее влияние на основные характеристики (длительность процесса и характеристики его завершения: размеры и число образующихся вторичных капель) прогрева и микро-взрывного распада двухжидкостных капель оказывает ограниченная группа факторов: концентрация жидкостей, начальные размеры капель и подведенный к поверхности капли тепловой поток (температура нагрева, соответственно). В случае капель эмульсий следует также добавить в качестве важных факторов [93,143]: размер капель дисперсной фазы (капель воды в объеме горючей жидкости, например, дизельного топлива), концентрация и тип стабилизатора. Результаты экспериментальных исследований по изучению основных влияющих факторов представлены в виде подразделов 2.7.1-2.7.6. Подраздел 2.7.1 посвящен влиянию температуры и теплового потока, подраздел 2.7.2 – влиянию схемы нагрева, подраздел 2.7.3 – влиянию концентрации жидкостей, подраздел 2.7.4 – влиянию размеров капель, подраздел 2.7.5 – влиянию вязкости, поверхностного и межфазного натяжения, подраздел 2.7.6 – влиянию коллективных эффектов на микро-взрывной распад капель, подраздел 2.7.7 – обобщению результатов.

2.7.1 Влияние температуры газовой среды

Результаты по изучению влияния температуры греющей среды на примере трех топливных композиций (вода/керосин, вода/дизельное топливо, вода/рапсовое масло) представлены на рис. 2.7.1.1.

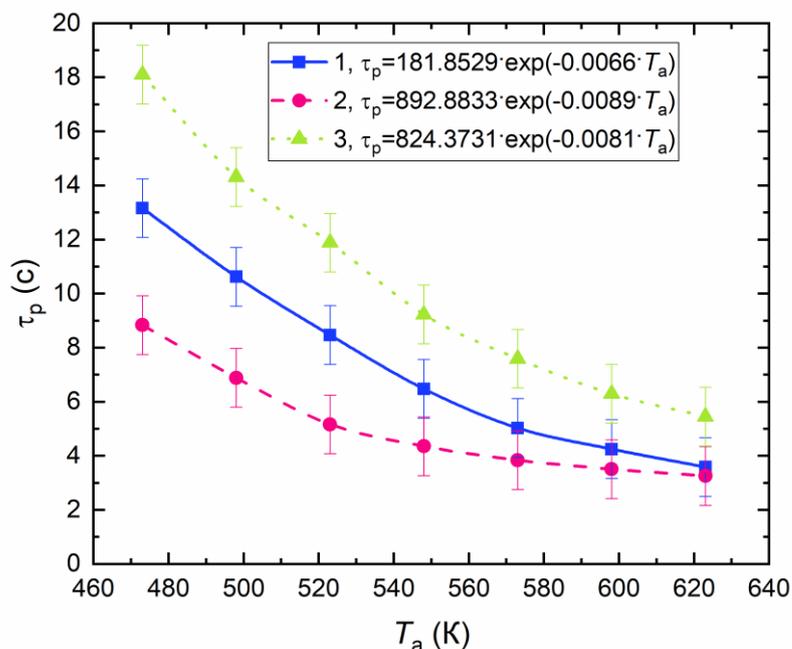


Рисунок 2.7.1.1 – Зависимость времени задержки микро-взрывного распада от температуры газовой среды с использованием экспериментального стенда, представленного на рис. 2.2.2 ($R_{d0} \approx 0.85$ мм, 10 % дистиллированной воды): 1 – вода/керосин; 2 – вода/дизельное топливо; 3 – вода/рапсовое масло.

Видно, что времена задержки микро-взрывного распада двухжидкостных капель нелинейно снижаются с ростом температуры греющей среды (рис. 2.7.1.1). Это обусловлено, главным образом, нелинейными (экспоненциальными) зависимостями скоростей испарения горючих и негорючих жидкостей от температуры [1,144,145]. При этом, чем значительнее (масштабнее) изменения этих скоростей при росте температуры, а также чем меньше температуры кипения, воспламенения и вспышки горючих жидкостей, тем существеннее менялись времена τ_p .

Диапазон температур, при которых проведены экспериментальные исследования, составлял 473–623 К при нагреве в разогретой камере (рис. 2.2.2). Данный диапазон обусловлен особенностями проведения экспериментов при нагреве в муфельной печи (рис. 2.2.2). Так, например, нижняя граница температурного диапазона обусловлена предельными условиями возникновения эффекта микро-взрывного распада двухжидкостных капель; верхняя – слетом

капель со стержня при помещении в высокотемпературную газовую среду при температурах выше 623 К.

Кроме того, хорошо видно, что на характеристики микро-взрывной фрагментации оказывает влияние материал горючей жидкости. Минимальные времена задержки микро-взрывного распада соответствуют составам, где в качестве горючей жидкости выбрано дизельное топливо, а максимальные – составам с рапсовым маслом. Это обусловлено тем, что дизельное топливо в своем составе содержит более летучие компоненты в отличие от рапсового масла, которое является трудно испаряемым веществом и содержит в своем составе более тяжелые компоненты (например, метиловые эфиры) [1], а также температуропроводность дизельного топлива больше температуропроводности рапсового масла на 20-25 %.

2.7.2 Влияние схемы нагрева

На рисунке 2.7.2.1 представлена зависимость времени задержки микро-взрывного распада двухжидкостных капель (вода/трансформаторное масло) от плотности теплового потока. Ниже приведены формулы для расчета плотностей тепловых потоков.

$$q_{\text{рад}} = \sigma_c \cdot [\varepsilon_d \cdot (T_a^4 - T_s^4) + \varepsilon_a \cdot T_a^4], \quad (2.6.2.1)$$

$$q_{\text{конв}} = h(T_a - T_s), \quad (2.6.2.2)$$

$$q_{\text{конд}} = k_f(T_{\text{sub}} - T_s) / R_d, \quad (2.6.2.3)$$

где $q_{\text{рад}}$ – радиационный тепловой поток, Вт/м²; σ_c – постоянная Стефана-Больцмана, Вт·м⁻²·К⁻⁴; ε_d – степень черноты для капли; T_a – температура воздуха, К; T_s – температура в приповерхностном слое капли, К; ε_a – степень черноты для воздуха; $q_{\text{конв}}$ – конвективный тепловой поток, Вт/м²; h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $q_{\text{конд}}$ – кондуктивный тепловой поток, Вт/м²; k_f – теплопроводность топлива, Вт/(м·К); T_{sub} – температура разогретой подложки, К; R_d – радиус капли, м.

Вычисления плотностей тепловых потоков проводились при конкретных значениях, иллюстрирующих оптические и теплофизические свойства компонентов системы, принятые из [130]. 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. 2.7.2.1, получены с использованием нескольких стендов для опытов, показанных ранее на рис. 2.2.1-2.2.4. Использование группы стендов позволило получить значения тепловых потоков в широком диапазоне от 0 до 100 кВт/м². Для каждого экспериментального стенда (рис. 2.2.1-2.2.4) 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. 2.2.2) и составляли от 10 до 30 кВт/м², а максимальные – в схеме с разогретой подложкой (рис. 2.2.3) 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 прогрева воды до 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 задержек распада капли при росте подведенного теплового потока. Нелинейность связана главным образом с

аналогичным характером зависимости скоростей испарения воды и топлива в составе двухжидкостной капли 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. 2.7.2.1 для каждой из трех кривых соответствуют предельным (минимальным) тепловым потокам, при которых реализовывался микро-взрывной распад двухжидкостных капель. Крайние правые значения на рис. 2.7.2.1 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.

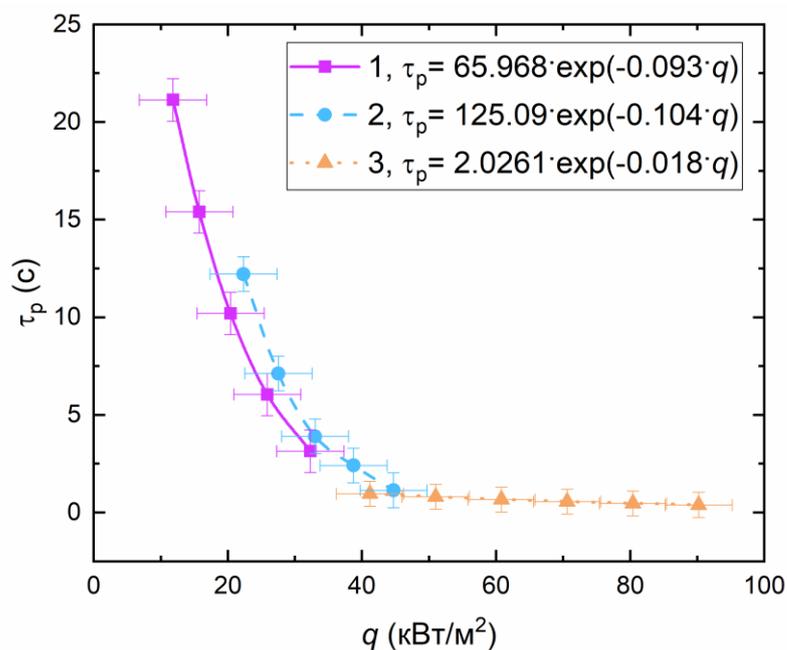
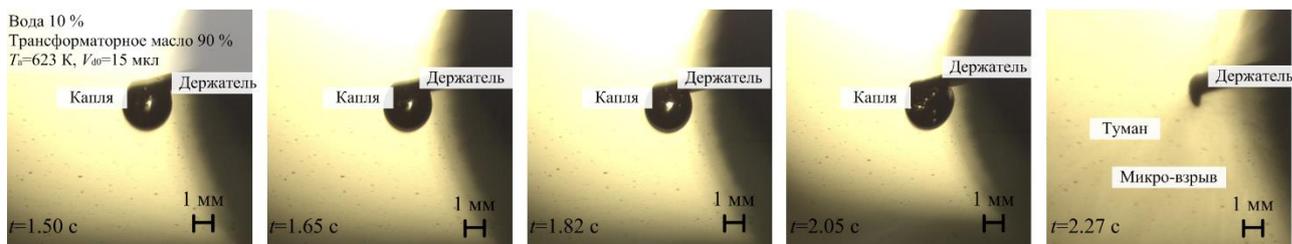


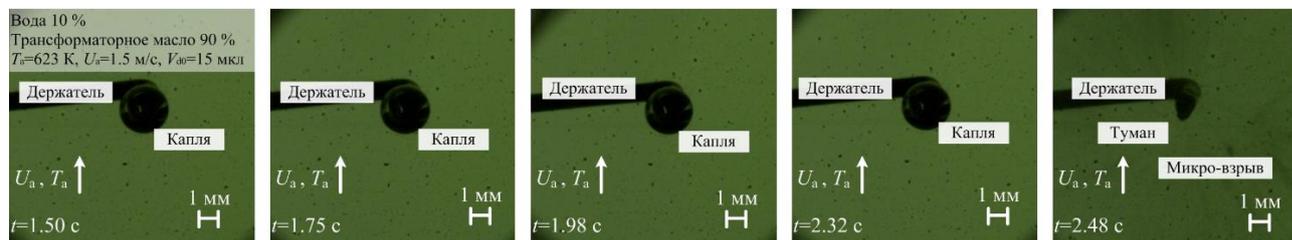
Рисунок 2.7.2.1 – Времена задержки микро-взрывного распада капель вода/трансформаторное масло ($R_{d0} \approx 1.53$ мм, 10 % дистиллированной воды) при изменении плотности теплового потока при разных схемах нагрева: 1 – экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.2.2; 2 – экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.2.1; 3 – экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.2.3.

Вид зависимостей $\tau_p(q)$ на рис. 2.7.2.1 подтверждает сформулированную в [21] гипотезу о механизме прогрева капель жидкостей в условиях интенсивного кондуктивного, конвективного и радиационного нагрева. Анализ численных значений q , соответствующих условиям распада капель (рис. 2.7.2.1), показывает, что в условиях лучистого нагрева при меньших тепловых потоках (по сравнению с конвективным нагревом) микро-взрывной распад капель происходит при немного меньших временах. Этот установленный в экспериментах результат может быть обусловлен значимым влиянием радиационного переноса энергии в жидкости при нагреве в муфельной печи. Капли прогреваются не только за счет теплопроводности, но также и вследствие переноса излучения в полупрозрачной среде. Вид кривой I на рис. 2.7.2.1 иллюстрирует значимость этого процесса в формировании температурного поля двухжидкостной капли и создании условий для ее быстрого микро-взрывного распада.

На рис. 2.7.2.2 представлены видеок cadры режимов прогрева, испарения и измельчения двухжидкостных капель вода/трансформаторное масло ($R_{d0}=1.53$ мм, 10 % дистиллированной воды) при трех схемах нагрева. Для каждой схемы зарегистрированы специфические особенности. Так, например, при нагреве на разогретой подложке (рис. 2.7.2.2в) характерным было, что капля в большей степени прогревалась с одной стороны, из-за чего нагрев был локальным и существенно неравномерным по трем пространственным координатам. Однако и в таких условиях двухжидкостная капля измельчалась с образованием аэрозоля. Регистрация методом PLIF показала, что температура на границе раздела сред достигала пикового значения 373.15–393 К, достаточного для интенсивного зарождения пузырьков на границе раздела «вода/топливо» и последующего схлопывания последних с фрагментацией исходной капли (аналогично опытам [18,20]). Доминирующим режимом разрушения при нагреве на разогретой подложке был распад двухжидкостной капли с образованием аэрозоля с размерами (радиусами) вторичных капель $r_{cd} \leq 0.01$ мм.



а



б



в

Рисунок 2.7.2.2 – Типичные видеокadres режимов прогрева, испарения и измельчения каплей вода/трансформаторное масло ($R_{до} \approx 1.53$ мм, 10 % дистиллированной воды) при разных схемах нагрева: а – экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.2.2; б – экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.2.1; в – экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.2.3.

Еще одна схема нагрева двухжидкостной капли основана на конвективном теплообмене в потоке высокотемпературных газов (рис. 2.7.2.2б). Так как двухжидкостная капля была подвешена на держателе, то поток натекал с одной стороны. При достижении условий микро-взрывного распада двухжидкостной капли регистрировались два варианта последствий: образование смога и тумана; диспергирование довольно крупных фрагментов (частей). При этом для первого варианта характерно, что капля накапливала «энергию распада» (т.е.

прогревалась, наполнялась пузырьками паров, но поверхность капли не трансформировалась, не регистрировалось набухание или схлопывание капли) в начальные моменты времени (визуально с поверхностью капли не происходило никаких изменений). А для второго режима за счет отрыва небольших фрагментов аккумулярованной в результате нагрева и кипения энергии не хватало для разрыва двухжидкостной капли с образованием тумана.

В отличие от вышеупомянутых схем с разогретой подложкой (рис. 2.2.3) и потоком разогретых газов (рис. 2.2.1) при нагреве в муфельной печи (рис. 2.2.2) двухжидкостная капля прогревалась равномерно со всех сторон, вследствие чего микро-взрывной распад капли происходил с образованием мелкодисперсного аэрозоля и тумана.

2.7.3 Влияние соотношения концентраций жидкостей

Наиболее ценными научными результатами для развития газопарокапельных технологий в области дизельных двигателей является зависимость времени задержки микро-взрывного распада от концентрации горючей жидкости (рис. 2.7.3.1). Важный результат выполненных экспериментов заключается в определении максимальных длительностей (наиболее инерционных условий) прогрева капель до микро-взрывного дробления, которые соответствуют равным концентрациям воды и горючей жидкости (или топлива) в капле (рис. 2.7.3.1).

Немонотонный характер кривой на рисунке 2.7.3.1 иллюстрирует сложный механизм разрушения двухжидкостных капель при нагреве в потоке нагретого воздуха (1), в муфельной печи (2) и на разогретой подложке (3). Увеличение доли топлива (горючей жидкости) в двухжидкостной капле приводит к росту вязкости и прочности приповерхностного слоя исходной капли. В результате такого упрочнения приповерхностного слоя растет время прогрева до микро-взрывного разрушения (рис. 2.7.3.1). Такой рост времени задержки микро-взрывного распада

характерен для значений объемной концентрации горючей жидкости в пределах до 50-70 %. В то же время увеличение доли топлива в двухжидкостной капле приводит не только к их упрочнению, но и одновременно снижается ее теплоемкость. Чем меньше доля воды в капле, тем меньше теплоемкость и быстрее капля прогревается до температуры начала взрывного кипения воды на границе раздела «вода/топливо». Данные закономерности иллюстрируют конкуренцию двух противоположных по знаку процессов при относительно равных в пределах от 50 до 70 % концентрациях топлива и воды. При достижении таких температур происходит существенная трансформация границы раздела и микро-взрывной распад капли. Водяной пар при малых концентрациях воды в капле может быстро разогреться до предельно высоких температур, соответствующих высоким давлениям в пузырьках пара. В результате реализуется распад капли на большое число мелких капель с размерами (радиусами) менее 0.01 мм.

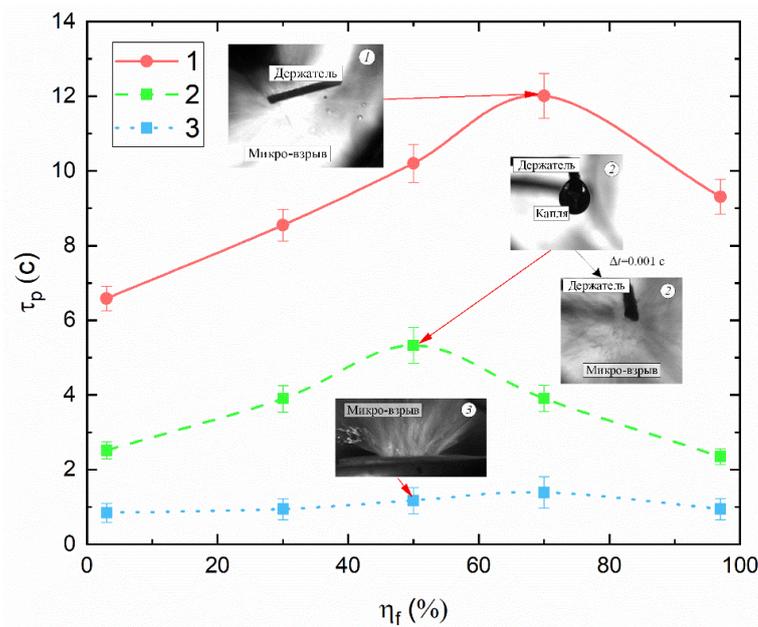


Рисунок 2.7.3.1 – Времена задержки микро-взрывного распада капель вода/трансформаторное масло ($R_{d0} \approx 1.53$ мм, $T_a \approx 623$ К) при варьировании концентрации топлива при разных схемах нагрева: 1 – экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.2.2; 2 – экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.2.1; 3 – экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.2.3.

Также видно (рис. 2.7.3.1), что времена задержки микро-взрывного распада при нагреве на разогретой подложке изменяются в малом интервале, несмотря на варьирование η_f в широком диапазоне. Этот результат иллюстрирует существенное отличие режимов микро-взрывного распада двухжидкостной капли на подложке от ее подвешивания на держателе в муфельной печи или потоке воздуха. Главное отличие заключается в том, что при нагреве на подложке обеспечивается контакт подложки с водой, перегрев которой и определяет распад двухжидкостной капли. В случае помещения капли на держателе топливо обволакивает каплю воды. Контакт воды с разогретым воздухом непостоянный и может реализовываться лишь после испарения пленки топлива. Причем данный контакт является локальным. Как следствие, и микро-взрывной распад капли происходил вследствие локального перегрева границы раздела «вода/топливо».

При обобщении результатов (рис. 2.7.3.1) для трех схем нагрева можно сформулировать заключение о том, что наименьшие времена τ_p могут быть обеспечены при максимальном отличии концентраций топлива и воды. При этом чем больше отличия теплофизических свойств, температур кипения, вязкости и поверхностного натяжения жидкостей, тем меньше будут времена задержки микро-взрывного распада двухжидкостных капель. Во всех экспериментах с однородными каплями (вода или масло) не регистрировались эффекты распада капли. При повышении температуры подложки или воздуха выше температур кипения соответствующих жидкостей регистрировались лишь эффекты перегрева, но распада не было.

Установленные в проведенных экспериментах закономерности прогрева и микро-взрывного дробления двухжидкостных капель несмешивающихся жидкостей с разной концентрацией жидкостей показывают, что в целом исследованный эффект дробления можно успешно реализовывать в большой группе технологий и в разных условиях нагрева. При этом комбинирование температурных и концентрационных условий позволяет изменять времена τ_p в несколько раз. Этот результат является наиболее ценным в настоящей

диссертационной работе, так как он иллюстрирует допустимые диапазоны изменения параметров и целесообразные характеристики соответствующих камер термической очистки жидкостей или сжигания топлив, систем их впрыска. Важно обеспечить стадийное последовательное дробление капель в процессе нагрева и испарения. Целесообразно учитывать данные закономерности при проектировании тепловых камер и разработке регламентов соответствующих технологий.

2.7.4 Влияние размеров и технологии формирования капель

На времена задержки микро-взрывного распада, кроме рассмотренных выше варьируемых параметров, существенное влияние оказывает начальный размер двухжидкостных капель. На рис. 2.7.4.1 представлены зависимости времени задержки микро-взрывного распада при варьировании начальных размеров капель при нагреве в пламени этанола и пропан-бутановой смеси с использованием экспериментального стенда, показанного на рис. 2.2.5. Начальный радиус капель варьировался от 0.55 мм до 0.85 мм. Верхняя граница данного диапазона обусловлена возможностью закрепления капли на держателе из нихромовой проволоки диаметром 0.2 мм без предварительной специальной обработки его поверхности. Большие по начальному размеру капли срывались до того момента как будут доставлены в область высокотемпературных газов. Нижняя граница R_{d0} соответствует возможностям используемого оборудования для генерации капель.

Показано, что с увеличением начальных размеров капель времена задержки микро-взрывного распада растут. Для всех R_{d0} значения τ_p ниже в пламени пропан-бутановой смеси. Это обусловлено тем, что в пламени пропан-бутановой смеси достигается более высокая температура газов $T_g \approx 1400$ К. Главным выводом по результатам рис. 2.7.4.1 является то, что уменьшение начальных размеров капель в 2–3 раза приводит к значительному снижению времени задержек распада

на 40–70 %. При адекватной локальной донастройке соответствующих технологических узлов можно обеспечить значительное повышение эффективности стадий прогрева, испарения, фрагментации, зажигания и выгорания топлив с разной дисперсностью впрыскиваемого капельного аэрозоля.

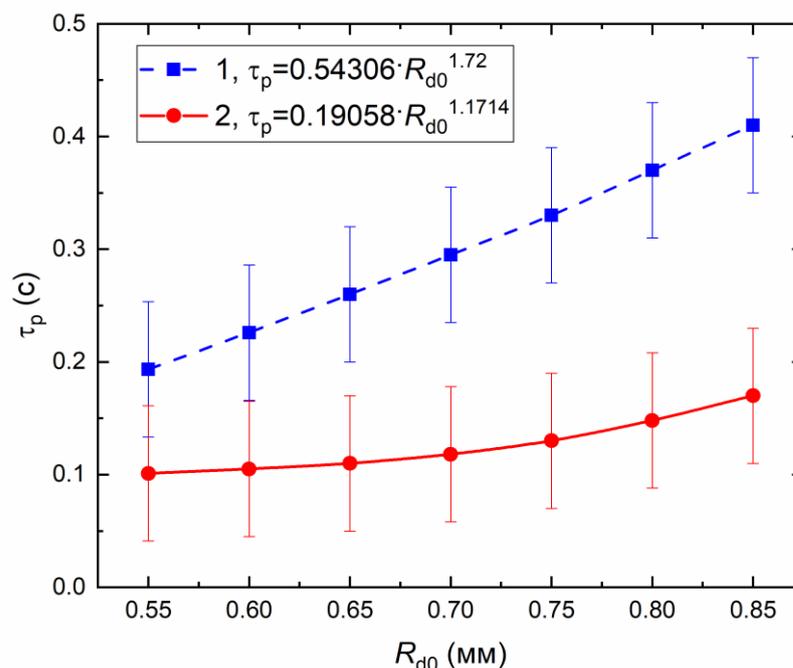


Рисунок 2.7.4.1 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада при варьировании начальных размеров капель при нагреве в пламени (двухжидкостные капли вода/рапсовое масло, объёмная концентрация воды составляет 10 %): 1 – этанола ($T_g \approx 1120$ К); 2 – пропан бутановой смеси ($T_g \approx 1400$ К).

На рис. 2.7.4.2 представлены зависимости времени задержки микро-взрывного распада при разном значении температуры пламени (а) и разном расстоянии от пламени этанола (б). Полученные кривые иллюстрируют существенно нелинейную зависимость времени задержки фрагментации капель от температуры, что хорошо коррелирует с ранними известными результатами [73,87] и обусловлено нелинейными зависимостями скоростей прогрева, испарения и роста пузырьков от температуры [76]. При анализе функции $T(h)$ в схеме рис. 2.2.5 установлено, что максимальные значения температуры

достигаются на границе «пламя/внешняя газовая среда». Поэтому значения τ_p минимальны в среднем диапазоне h .

Анализ рис. 2.7.4.2 также позволяет добавить, что отличия τ_p в зоне пламени могут достигать нескольких сотен процентов при изменении температуры всего на 200 К. Это показывает, что в типичных топочных камерах с перепадами температуры 100-200 К капли фрагментируют с разным временем задержки. Как следствие, капли проходят разное расстояние от форсунки до зоны фрагментации и горения. Эти процессы также будут приводить к формированию перепада температуры в камере сгорания. Поэтому аэрозольное облако топлива в камере будет существенно полидисперсным.

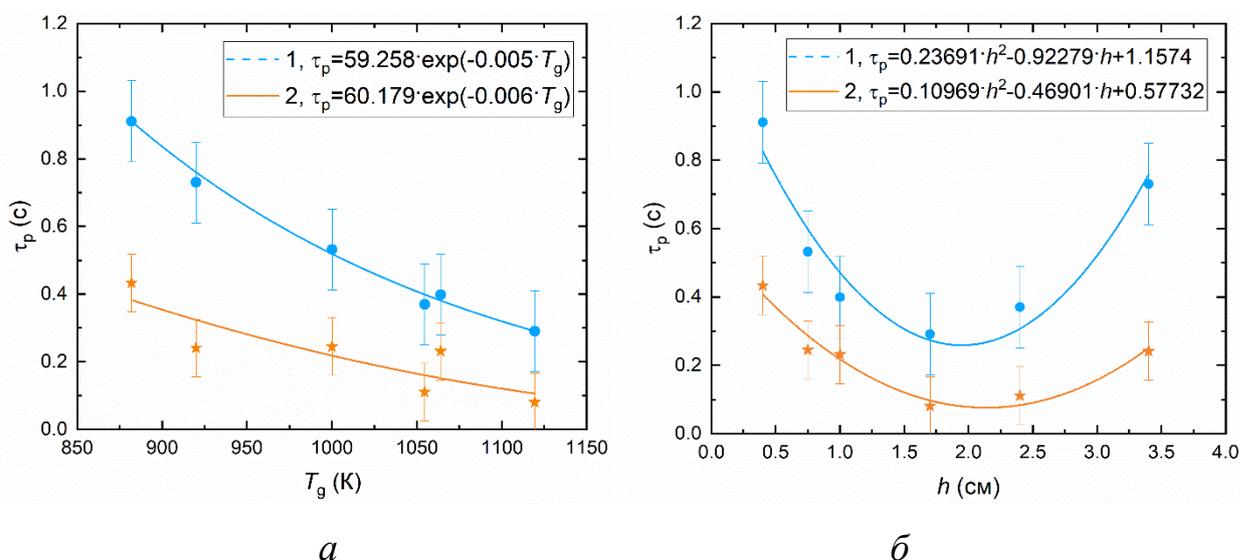


Рисунок 2.7.4.2 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада при разном значении температуры (а) и разном расстоянии от пламени этанола (б). Параметры эксперимента: капли вода/рапсовое масло, 10 % воды, $R_{d0} \approx 0.78$ мм, пламя этанола: 1 – двухжидкостные капли; 2 – капли эмульсий.

На рис. 2.7.4.3 представлены зависимости отношения площади поверхности испарения жидкости после и до распада S_1/S_0 от температуры пламени T_g . Можно выделить несколько эффектов. Во-первых, хорошо видно, что отношение S_1/S_0 для двухжидкостных капель при распаде в режиме микро-взрывной фрагментации растет существенно быстрее при увеличении температуры. Это обусловлено не

только тем, что в режиме микро-взрывной фрагментации образуется аэрозольное облако с меньшим значением среднего размера вторичных капель r_{cd} , но и тем, что капля прогревается дольше, чем в режиме «паффинг» (рис. 2.7.4.4). Чем дольше прогорев капли, тем на большую глубину прогреваются слои воды-менее летучего компонента. Это способствует росту числа пузырьков и, соответственно, количества вторичных капель. Во-вторых, вид кривых идентичен при росте температуры, т.е. отличия значений S_1/S_0 сохраняются. Это позволит прогнозировать значения S_1 при разных температурах для схем с заранее приготовленными эмульсиями или при смешении капель топлива и воды в камере сгорания. В-третьих, даже для крупных исходных капель и при относительно невысокой температуре можно получить значение S_1/S_0 более 10. В реальных же топливных технологиях значения этого отношения могут быть существенно выше.

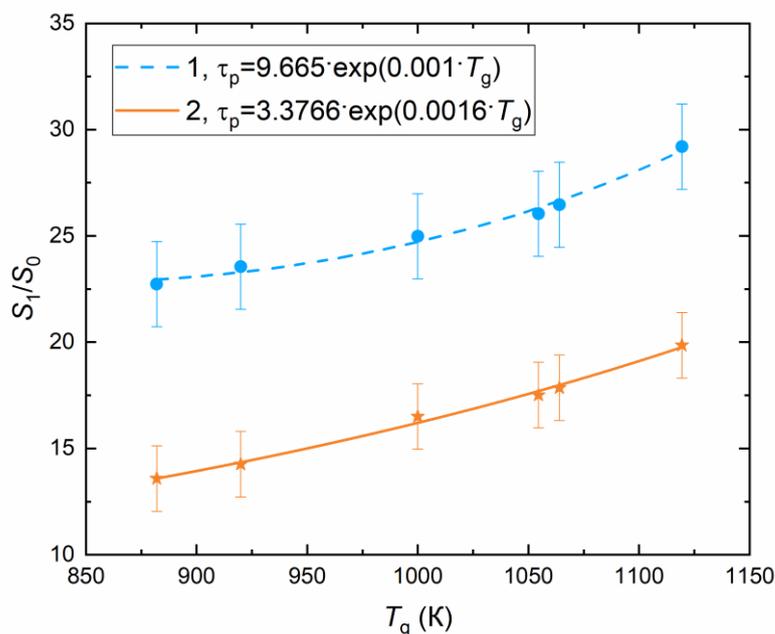


Рисунок 2.7.4.3 – Зависимости отношения площади поверхности испарения жидкости после и до распада S_1/S_0 при разном значении температуры пламени T_g (капли вода/рапсовое масло, 10 % воды, $R_d \approx 0.78$ мм, пламя этанола): 1 – двухжидкостные капли; 2 – капли эмульсий.

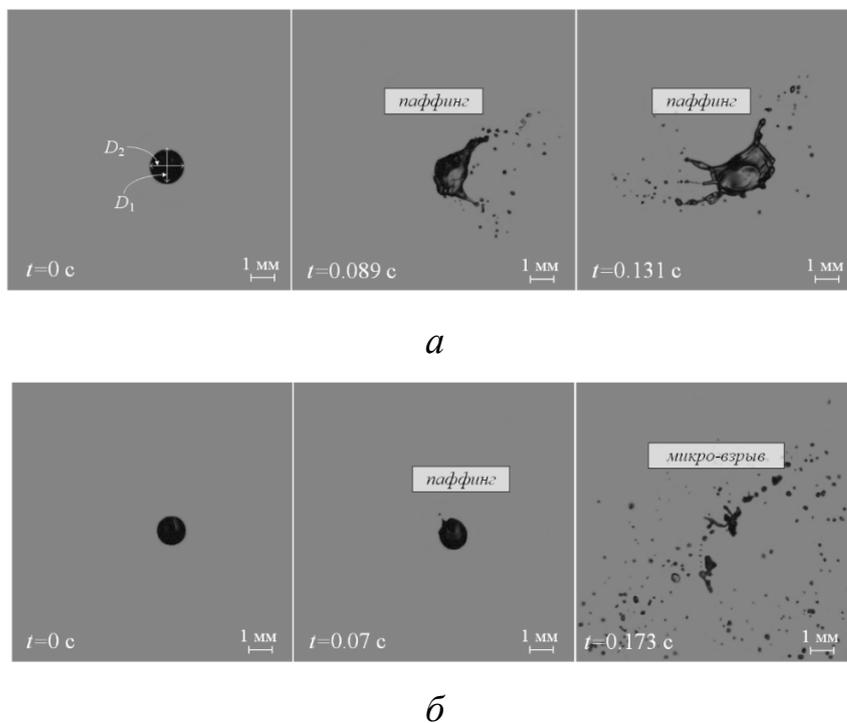


Рисунок 2.7.4.4 – Типичные видеокадры «паффинг» в капле эмульсии (а) и микро-взрывной фрагментации в двухжидкостной капле (б). Параметры эксперимента: капли вода/рапсовое масло, 10 % воды, $T_g = 1000-1100$ К, $R_d \approx 0.5$ мм, пламя этанола.

При сравнительном анализе видеокадров опытов, выполненных с двухжидкостными каплями и эмульсиями в диапазоне температур (1000-1150 К), установлено, что наиболее типичным режимом фрагментации для эмульсии является «паффинг», а для двухжидкостных капель – микро-взрывная фрагментация (рис. 2.7.4.4). Это можно объяснить тем, что вода в каплях эмульсии распределена равномерно, а в двухжидкостной капле – вода сконцентрирована в ее центральной части (в виде ядра). Поэтому при нагреве капли эмульсии локальные объемы поверхности нагреваются до температуры кипения воды и определяют объем жидкости, который отрывается от исходной капли – происходит «паффинг». Эти процессы реализуются быстрее, чем микро-взрывная фрагментация. При нагреве двухжидкостной капли регистрировались условия, при которых «паффинг» не происходил, вода в виде ядра капли нагревалась через оболочку из горючей жидкости. Затем регистрировались

флуктуации поверхности капли вследствие эффектов расширения и испарения, а также за счет зарождения и роста пузырьков. Все эти процессы приводили к утоньшению пленки горючей жидкости и, соответственно, капля фрагментировала с образованием большой совокупности мелких вторичных капель.

2.7.5 Влияние вязкости, поверхностного и межфазного натяжения жидкостей

На рис. 2.7.5.1 представлены зависимости времен задержки микро-взрывного распада капель эмульсий (т.е. длительности процесса от начала нагрева до условий фрагментации, приводящей к переходу от родительской капли к вторичным каплям) при варьировании температуры потока воздуха для составов с различной вязкостью. Для варьирования вязкости исследуемых составов в дизельном топливе растворялся бутилкаучук ВК-1675N, производство Нижнекамскнефтехим (Республика Татарстан). Массовая доля полимера в концентрате составляла 0.05 г/мл. Добавление данного полимера увеличивало вязкость дизельного топлива. На начальном этапе осуществлялось смешивание дизельного топлива, содержащего полимер, с требуемым количеством дизельного топлива без полимера для достижения заданного значения вязкости. После чего в полученный раствор вводилось требуемое количество воды. Вязкость составов исследовалась с помощью вискозиметра Brookfield DV3T LV при комнатной температуре жидкости (в пределах диапазона 293–296 К). Для измерения вязкости жидкостей (в пределах диапазона $\mu=0.001\text{--}6000$ Па·с) в стандартный набор вискозиметра входили 4 шпинделя. Скорость вращения шпинделей варьировалась в диапазоне 10–250 об./мин [146]. Погрешность измерения установки в соответствии ASTM D445 составила $\pm 1\%$. Для измерения вязкости исследуемый состав помещался в специальный цилиндр, устанавливающийся в вискозиметре. Для каждого состава в зависимости от вязкости выбирался шпиндель. В частности, для низковязких жидкостей использовался наибольший шпиндель, для

высоковязких – наименьший. С помощью программного обеспечения RheocalcT, обеспечивающего автоматическое управление и сбор данных, вычислялись значения характеристик каждого жидкостного состава. Начальный объем капель составлял 5 мкл, что соответствовало начальному радиусу $R_{d0} \approx 1.06$ мм.

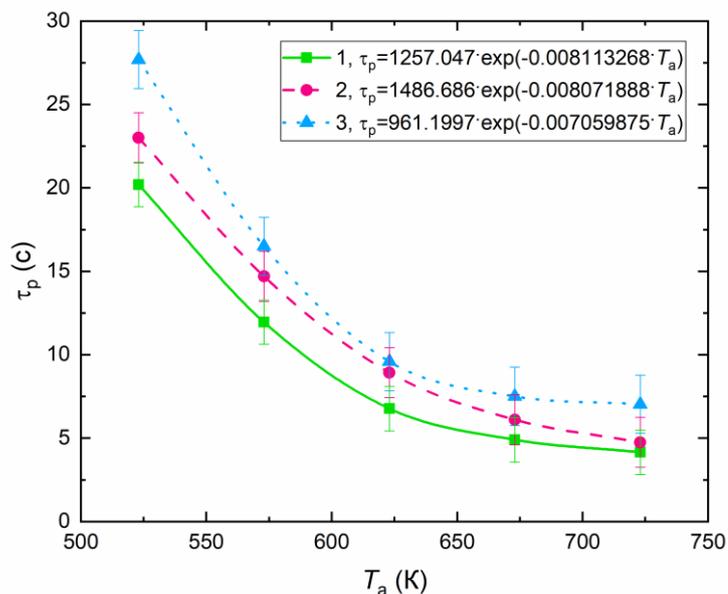


Рисунок 2.7.5.1 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада капле эмульсий от температуры потока воздуха при варьировании вязкости: 1 – дизельное топливо 90 %, вода 10 % ($\mu \approx 0.00259$ Па·с); 2 – дизельное топливо 80 %, дизельное топливо с полимером 10 %, вода 10 % ($\mu \approx 0.00377$ Па·с); 3 – дизельное топливо 45 %, дизельное топливо с полимером 45 %, вода 10 % ($\mu \approx 0.01668$ Па·с).

Полученные зависимости (рис. 2.7.5.1) демонстрируют, что с ростом вязкости времена задержки распада исследуемых капель возрастают. Это связано с тем, что с ростом вязкостных сил (часто называют силами внутреннего трения) в капле требуется больше энергии для ее трансформации и разрушения. Основной этап микро-взрывного распада капле состоит в том, что на границе между топливом и водой зарождаются пузырьки паров воды и растут. При превышении давления паров данных пузырьков над давлением внешней газовой среды, действующем на каплю, происходит ее распад с образованием облака мелких фрагментов. В случае высокой вязкости жидкости капли рост паровых пузырьков

и их коалесценция замедляются. Поэтому давление паров в капле растет медленно. По выделенным тенденциям установленные зависимости хорошо соответствуют результатам опытов [88]. Однако в настоящей диссертационной работе для всех составов установлена общая закономерность – с ростом температуры времена задержки микро-взрывного распада капель эмульсий нелинейно снижаются, что обусловлено возрастанием теплового потока, подводимого к капле. Нелинейный характер кривых обусловлен экспоненциальными зависимостями скоростей испарения горючих и негорючих жидкостей от температуры (в соответствии с данными [76,88]). Стабильные условия микро-взрывного дробления достигались при температуре потока воздуха выше 573 К. При более низких температурах происходило чередование режимов монотонного испарения и диспергирования. Поэтому максимальные отличия кривых на рис. 2.7.5.1 соответствовали диапазону температур 523–573 К.

На рис. 2.7.5.2 представлены зависимости времени задержки микро-взрывного распада капель эмульсий при варьировании температуры потока воздуха для составов с различным межфазным натяжением. Начальный объем капель составлял 5 мкл, что соответствовало радиусу $R_{d0} \approx 1.06$ мм. Как видно из рис. 2.7.5.2, с ростом температуры времена задержки микро-взрывного распада капель нелинейно снижаются. Для измерения межфазного натяжения применялся сталагмометр СТ-2, предназначенный для определения натяжения растворов ПАВ методом определения объема капель, выдавливаемых на границе «дизельное топливо с эмульгатором / вода» [131]. Исследуемый жидкостной состав помещался в стеклянный цилиндр, на конце которого находился U-образный капилляр. Конец последнего располагался в воде. Скорость вытекания капель состава в воду регулировалась с помощью винтового зажима. С помощью микрометра, расположенного в верхней части прибора, определяется объем капли. Принцип действия основан на том, что при вращении микрометра растет давление надвигающийся шток поршня, расположенный в стеклянном цилиндре. Проводились измерения характеристик генерируемых капель (около 30 шт в

рамках серии), рассчитывалось среднее значение (Δa_{cp}). Для расчета межфазного натяжения применялась формула: $\sigma_0 = k_{st}(\rho_w - \rho_c) \cdot \Delta a_{cp}$. Вычисления проводились при: $k_{st} = 994.2$ – константа сталагмометра; $\rho_w = 1$ г/см³ – плотность воды; $\rho_c = 0.828$ г/см³. Для варьирования межфазного натяжения использовались 3 состава с различной концентрацией эмульгатора D_cD (без эмульгатора, 0.08 г/л, 1.6 г/л).

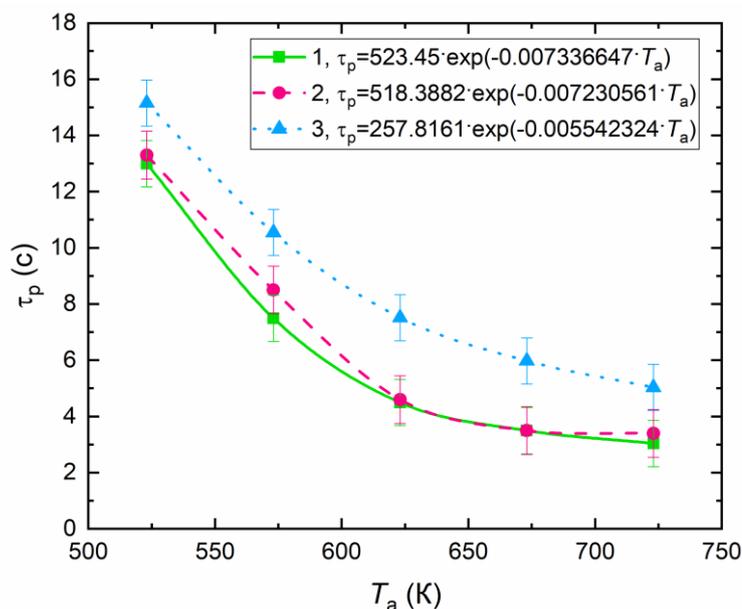


Рисунок 2.7.5.2 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада капле эмульсий при варьировании температуры потока воздуха для составов с различным межфазным натяжением: 1 – дизельное топливо 90 %, вода 10 % ($\sigma_0 \approx 0.04257$ Н/м); 2 – дизельное топливо (0.08 г/л эмульгатора) 90 %, вода 10 % ($\sigma_0 \approx 0.02249$ Н/м); 3 – дизельное топливо (1.6 г/л эмульгатора) 90 %, вода 10 % ($\sigma_0 \approx 0.00341$ Н/м).

При анализе рис. 2.7.5.2 установлена закономерность, что при максимальном значении межфазного натяжения и минимальном содержании эмульгатора времена задержки микро-взрывного распада капле эмульсий минимальны. Это связано с тем, что при добавлении эмульгатора композиция становится более стабильной – реологически устойчивой в течение времени хранения и при нагреве. Основным режимом дробления капле, в составе которых находился дизель, содержащий D_cD эмульгатор, являлся «паффинг». При

первичном анализе можно было предположить, что чем выше межфазное натяжение, тем прочнее связи на границе «вода/топливо» и тем больше энергии потребуется для их разрушения. Эта гипотеза была обоснована в эксперименте. Она соответствует балансу энергий и сил в капле. Проведенные эксперименты показали, что в случае повышения межфазного натяжения режим «паффинг» может начинаться даже при меньшем времени нагрева (хорошо видно на рис. 2.7.5.2). На кадрах видеogramм было видно, что это обусловлено высвобождением единичных капелек воды и пузырьков с водяными парами из приповерхностного слоя. Чем выше межфазное натяжение, тем сложнее обеспечить зарождение и рост пузырьков пара во всем объеме капли. Лишь единичные капельки воды в приповерхностном слое прогреваются до температуры кипения, и в их близи образуются паровые пузырьки. Давления в последних достаточно для частичной фрагментации приповерхностного слоя капли, но обеспечить полный распад, т.е. микро-взрывную фрагментацию при температурах нагрева до 723 К невозможно. При таких условиях за счет «паффинга» происходило уменьшение объема капли.

Зависимости времени задержки микро-взрывного распада капель эмульсий при варьировании температуры потока воздуха для составов с разным поверхностным натяжением представлены на рис. 2.7.5.3.

Варьирование поверхностного натяжения осуществлялось за счет добавления ПАВ (Tween 20 и Tween 80) в воду. Tween 80 и Tween 20 принадлежат к одному гомологическому ряду, но оказывают различное влияние на поверхностное натяжение воды [147]. Tween 80 основан на двойной связи в олефиновой группе. Tween 20 основан на прямой углеводородной цепи [147]. Также следует отметить, что Tween 20 обладает лучшими стабилизирующими свойствами, чем Tween 80 [147,148]. Поскольку снизить поверхностное натяжение дизельного топлива достаточно сложно, то для исследования влияния этой характеристики приготавливалась прямая эмульсия. Капельный тест [149] показал, что эмульсия перемешивается с водным объемом довольно равномерно. Соответственно, поверхностное натяжение капли эмульсии принималось равным

поверхностному натяжению воды. В экспериментах по варьированию поверхностного натяжения использовались 3 состава (без Tween, с Tween 20, с Tween 80). Измерение поверхностного натяжения проводилось с помощью тензиометра К6 фирмы KRUSS методом отрыва кольца (метод дю Нуи) при температуре 300 К. Калибровка прибора осуществлялась с помощью измерения поверхностного натяжения би-дистиллированной воды (поправочный коэффициент=0.995). Начальный объем капель составлял 5 мкл. Основным результатом проведенных опытов является то, что минимальные времена распада соответствуют составу с максимальным поверхностным натяжением. Полученный результат является довольно неожиданным и противоречащим заключениям [10], но объясняется тем, что добавление Tween в состав капель не только влияет на изменение поверхностного натяжения, но и влияет на изменение режимов распада. В случае составов без Tween характерным режимом распада была микро-взрывная фрагментация, а с Tween – «паффинг». В результате микро-взрывной фрагментации исходные капли разрывало с образованием облака мелких капель, которые быстро испарялись, а режим «паффинг» являлся достаточно продолжительным. Поэтому времена τ_p в случае «паффинг» были выше (рис. 2.7.5.3). Добавление Tween в состав капли стабилизировало эмульсии и препятствовало равномерному прогреву капли и зарождению пузырьков пара по всему объему капли [147,148]. При этом Tween 20 обладает лучшими стабилизирующими свойствами, чем Tween 80 [147,148]. Основные особенности поведения капелек воды в дизельном топливе при добавлении Tween заключались в том, что данная примесь препятствовала их коагуляции, т.е. укрупнению. Поэтому времена прогрева капель до полного распада возрастали аналогично опытам с увеличением вязкости жидкостных составов, характеризующей повышение энергии внутреннего трения. В проведенных опытах зарегистрировано, что чем больше становилась полидисперсность капелек воды в дизельном топливе при нагреве (образовывались группы агломератов различных размеров), тем быстрее капля становилась термодинамически не стабильной и

разрушалась за счет диспергирования. Чем меньше концентрация Tween, тем быстрее и больше формировалось таких агломератов. Поэтому можно сформулировать гипотезу о том, что при учете только изменения поверхностного натяжения в целом должно наблюдаться снижение времен существования капель (аналогично [10,88]), так как это соответствует энергетическому балансу в капле при учете всех действующих сил. Чем ниже энергия поверхностного натяжения жидкости, тем при меньших подведенных внешних силах можно разрушить каплю.

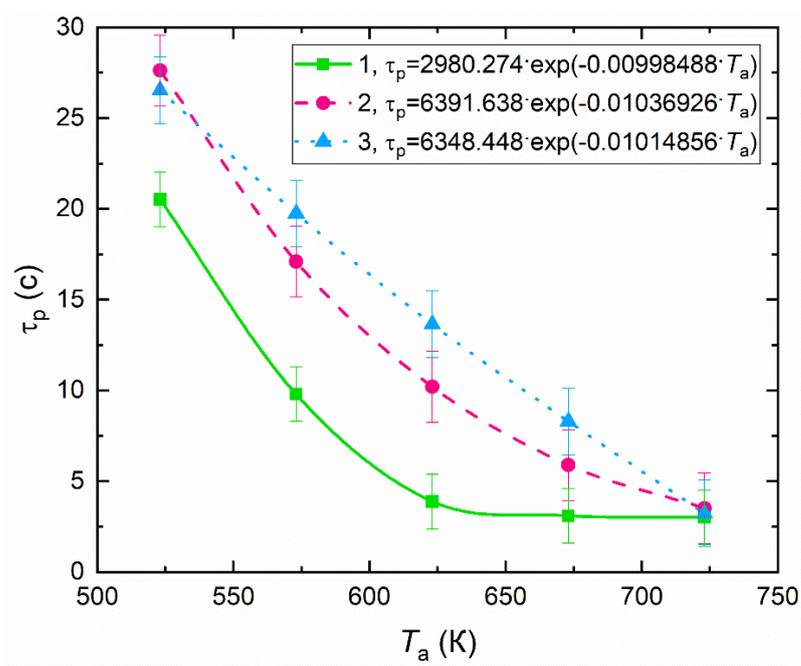


Рисунок 2.7.5.3 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада капель эмульсий при варьировании температуры потока воздуха для составов с разным поверхностным натяжением: 1 – дизельное топливо (1.6 г/л эмульгатора) 40 %, вода 60 % ($\sigma \approx 0.07269$ Н/м); 2 – дизельное топливо (1.6 г/л эмульгатора) 40 %, вода 59.5 %, 0.5 % Tween-80 ($\sigma \approx 0.0474$ Н/м); 3 – дизельное топливо (1.6 г/л эмульгатора) 40 %, вода 59.5 %, 0.5 % Tween-20 ($\sigma \approx 0.0401$ Н/м).

2.7.6 Микро-взрывной распад капель в условиях близких к реальным газопарокапельным технологиям

Для приближения к реальным условиям газопарокапельных технологий выполнен переход от подвешенных капель топливных эмульсий к свободно падающим в разогретом воздухе. Эксперименты по регистрации процессов микро-взрывной фрагментации топливных эмульсий в свободном падении при высокотемпературном нагреве проведены с использованием экспериментального стенда, представленного на рисунке 2.2.4.

Методика проведения экспериментов предполагала несколько этапов. На держателе (падение одиночной капли) или группе держателей (падение группы капель), представленном на рисунке 2.2.4, при помощи дозаторов формировались исследуемые капли топливных эмульсий заданного размера. Затем капли сбрасывались за счет механического контакта автоматизированного механизма с держателем и свободно падали в потоке высокотемпературных газов. Высокоскоростная камера регистрировала быстропротекающие процессы распада капель топливных эмульсий. Обработка видеокadres осуществлялась с использованием программного обеспечения Phantom Camera Control. Частота съемки при проведении экспериментов составляла 5400 кадров в секунду, температура в печи варьировалась в диапазоне от 1073 до 1373 К, а диаметр исследуемых капель от 0.62 до 1.34 мм. Во время свободного падения на каплю воздействовали все три основных тепловых потоков: кондуктивный, радиационный (от стенок муфельной печи и разогретого газа) и конвективный (вследствие движения в высокотемпературной газовой среде). Эти три основных тепловых потока хорошо согласуются с перспективными газопарокапельными приложениями, перечисленными во введении. В частности, в реальных установках по сжиганию жидких топлив температура сжигания составляет от 1073 до 1473 К, иногда и выше [150]. При этом скорость движения потока подаваемого в камеру сгорания воздуха составляет от 1–2 м/с до 30–50 м/с [150].

Огневая очистка жидкостей осуществляется при температурах от 1173 до 1273 К и скоростях движения каплей от 0.5–1 м/с до 5–7 м/с [4].

На рис. 2.7.6.1 представлены зависимости времени задержки распада от температуры нагрева для двух составов: 1 – 10 % вода, 90 % рапсовое масло, 2 – 10 % вода, 90 % дизельное топливо. Начальный объем исследуемых каплей составлял 2.5 мкл ($D_0 \approx 1.68$ мм). Температура варьировалась от 1123 К до 1323 К. Предельные температуры этого диапазона обусловлены тем, что при температурах в нагревательной камере ниже 1123 К дробление капли не зарегистрировано. Выше 1323 К процесс прогрева до распада вследствие диспергирования занимал очень малое время, в течение которого не всегда удавалось каплю сбросить с наконечника, который устанавливался перед входом в камеру сгорания. Поэтому выше данного значения температуры проводить эксперименты было довольно затруднительно.

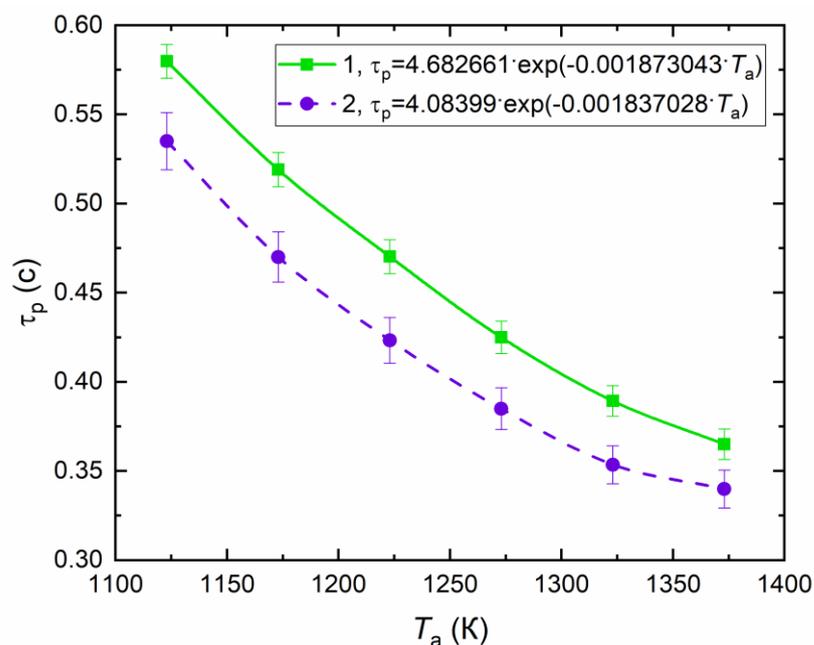


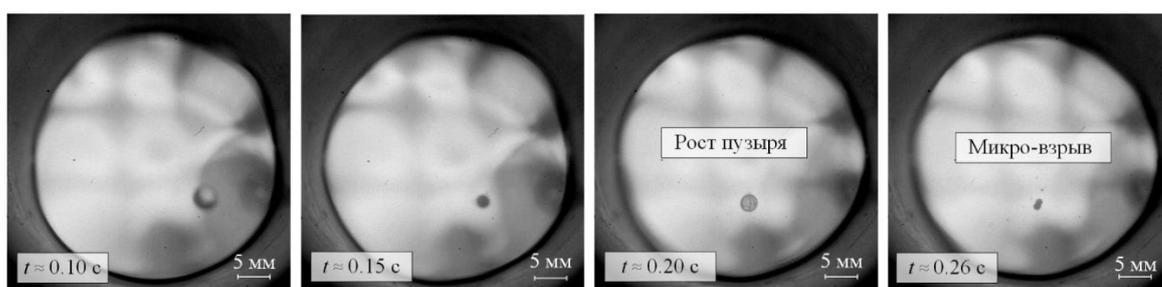
Рисунок 2.7.6.1 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада свободно падающих двухжидкостных каплей при разных температурах нагрева и тепловых потоках, подводимых к капле ($R_{d0} \approx 0.842$ мм): 1 – 10 % вода, 90 % рапсовое масло, 2 – 10 % вода, 90 % дизельное топливо.

Во всем диапазоне указанных выше температур для исследуемых капель основным режимом дробления была микро-взрывная фрагментация (лишь в единичных случаях регистрировался «паффинг», реализация которого обусловлена касанием капель стенки муфельной печи, результаты таких экспериментов исключались из последующего рассмотрения). Правомерно было выполнять сравнительный анализ результатов опытов с режимом микро-взрывной фрагментации. Основной закономерностью, выявленной в ходе проведения экспериментов по варьированию температуры, являлось то, что с увеличением температуры газовой среды времена задержек распада существенно нелинейно уменьшались. При увеличении температуры возрастали значения радиационного и конвективного тепловых потоков, подводимых к капле. С увеличением температуры греющей среды время задержки микро-взрывного распада капель уменьшалось нелинейно. Данный эффект связан с экспоненциальными зависимостями скоростей испарения горючих и негорючих жидкостей от температуры [76], а также цепным характером развития микро-взрывного распада перегретой капли (зарождение одного пузырька способствовало росту большой группы новых). Результаты проведенных экспериментов показали, что времена распада капель с 90 % дизельного топлива при увеличении температуры от 1123 до 1323 К уменьшаются ~ на 50 %, а для капель с 90 % рапсового масла ~ на 12 %.

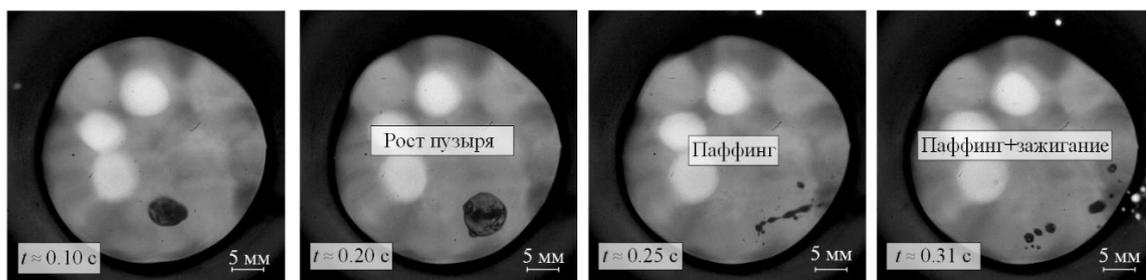
Типичные видеокадры процессов микро-взрывного распада двухжидкостных капель и эмульгированных топлив при свободном падении представлены на рис 2.7.6.2.

Важным, с точки зрения практических приложений, является изучение времени задержки зажигания двухжидкостных капель, а именно насколько происходит снижение этих параметров с учетом эффектов «паффинг»/микро-взрыва. На рис. 2.7.6.3 приведены времена задержки зажигания различных однородных и двухжидкостных капель в зависимости от температуры греющей среды. Времена задержки зажигания определялись как разница между моментом входа капель в камеру сгорания и иницированием их горения (для случая с

однородными каплями) или вторичных капель (для случая двухжидкостных капель после распада). Достаточно хорошо видно, что микро-взрывной распад существенно интенсифицирует зажигание вследствие кратного уменьшения размеров вторичных фрагментов. При этом особенно заметным становится, что даже небольшая доля вводимой низкокипящей жидкости (воды) способствует существенной интенсификации микро-взрывного распада и зажигания, несмотря на рост количества энергии, расходуемой на эндотермические фазовые превращения.



a



б

Рисунок 2.7.6.2 – Типичные видеокадры процессов микро-взрывного распада двухжидкостных капель (*a*) и эмульгированных топлив (*б*) при свободном падении.

Сравнительный анализ рис. 2.7.6.3 показывает довольно существенные отличия времени прогрева до микро-взрывного разрушения капель и последующего зажигания капель с горючей жидкостью в виде дизельного топлива и рапсового масла. Отличия времени задержки микро-взрывного распада обусловлены в основном существенными различиями поверхностного натяжения

и вязкости, а также теплофизических свойств (температуροпроводности). Времена задержки зажигания же в основном определяются разницей температуры вспышки, температуры кипения и теплоты парообразования дизельного топлива и рапсового масла. По этим характеристикам рапсовое масло представляет чрезвычайно инертную среду. Во всех проведенных предварительных экспериментах свободно падающие капли рапсового масла не зажигались в использованной камере сгорания (т.е. длительностей движения менее 1 с даже при температуре 1323 К было недостаточно). Добавление воды в такого типа каплю способствовало ее измельчению и последующему зажиганию отлетающих фрагментов рапсового масла в виде аэрозольного облака. Капли дизельного топлива зажигались как при добавлении воды в их состав, так и без воды. Но лишь за счет воды удавалось интенсифицировать микро-взрывной распад и существенно уменьшить времена задержки зажигания (рис. 2.7.6.3). Поэтому можно сделать вывод о том, что такой способ вторичного измельчения капель приводит к снижению инерционности зажигания топлив с разной реакционной способностью (чем меньше этот параметр для топлива, тем масштабнее вклад микро-взрывного измельчения).

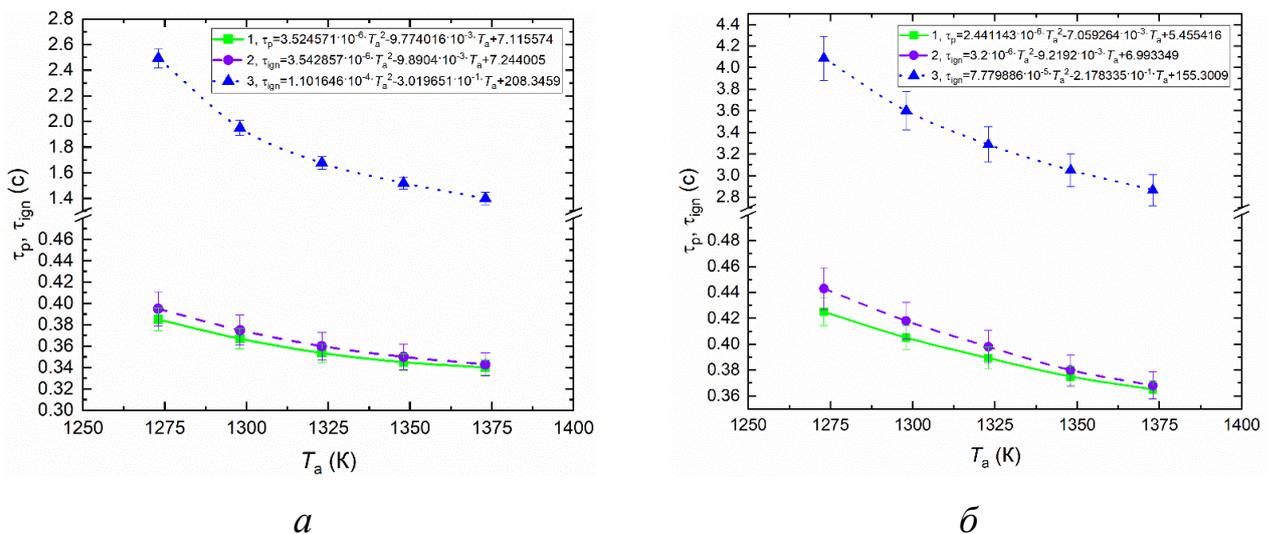


Рисунок 2.7.6.3 – Сравнение времени задержки микро-взрывного распада (1) и времени задержки зажигания (2) двухжидкостных капель «вода/топливо» (объёмная концентрация воды 10 %) и однородных капель топлива (3) ($R_{d0} \approx 0.842$ мм): *a* – на основе дизельного топлива; *б* – на основе рапсового масла.

Эти результаты особенно важны для развития теории зажигания и газификации существенно неоднородных топливных составов [102,103,151,152] на основе отходов углеобогащения, нефтепереработки, низкосортных топлив, технологических и сточных вод, а также дополнительных жидких (горючих и негорючих) и твердых (неметаллических и металлических) примесей разного происхождения, применяемых для интенсификации зажигания и стабилизации горения.

На рис. 2.7.6.4 показаны зависимости отношения площади поверхности испарения после и до распада S_1/S_0 от температуры греющей среды для двухжидкостных капель при свободном падении.

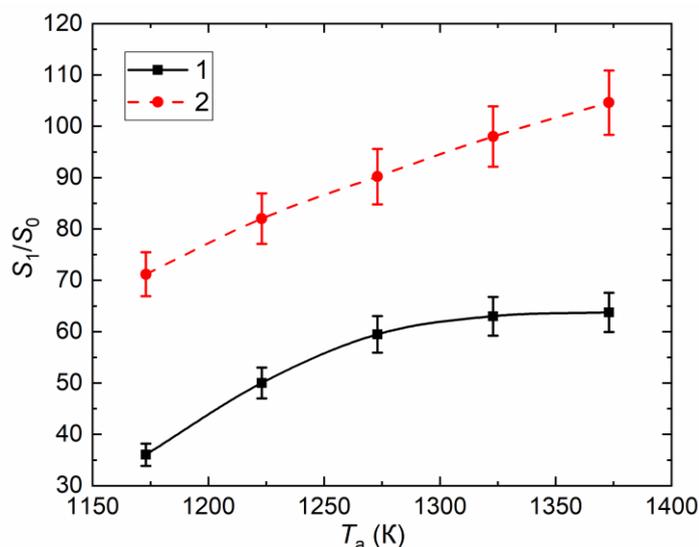


Рисунок 2.7.6.4 – Зависимость отношения площади поверхности испарения после и до распада S_1/S_0 от температуры греющей среды для двухжидкостных капель при свободном падении ($D_0 \approx 1.68$ мм): 1 – 90 % дизельное топливо, 10 % вода; 2 – 90 % рапсовое масло, 10 % вода.

Хорошо видно (рис. 2.7.6.4), что процессы микро-взрывной фрагментации позволяют увеличить площадь поверхности испарения капли более чем в 100–200 раз. Характерной особенностью всех экспериментов с формированием аэрозольного облака являлось распространение с высокой скоростью образующихся вторичных капель по высокотемпературной газовой среде. Данное

явление может быть использовано при определении оптимального расстояния между исходными каплями, которые в процессе микро-взрывной фрагментации будут заполнять весь объем камеры сгорания. Оптимальным расстоянием считается расстояние, при котором будет происходить перекрывание аэрозольных облаков, образуемых соседними каплями.

На рисунке 2.7.6.5 представлена карта режимов измельчения группы капель топливных эмульсий на основе рапсового масла 90 % и воды 10 % в зависимости от разницы времени задержки распада первой и последующих капель $\Delta\tau_p$ и отношения L/R_{d0} , где L – расстояние между соседними каплями.

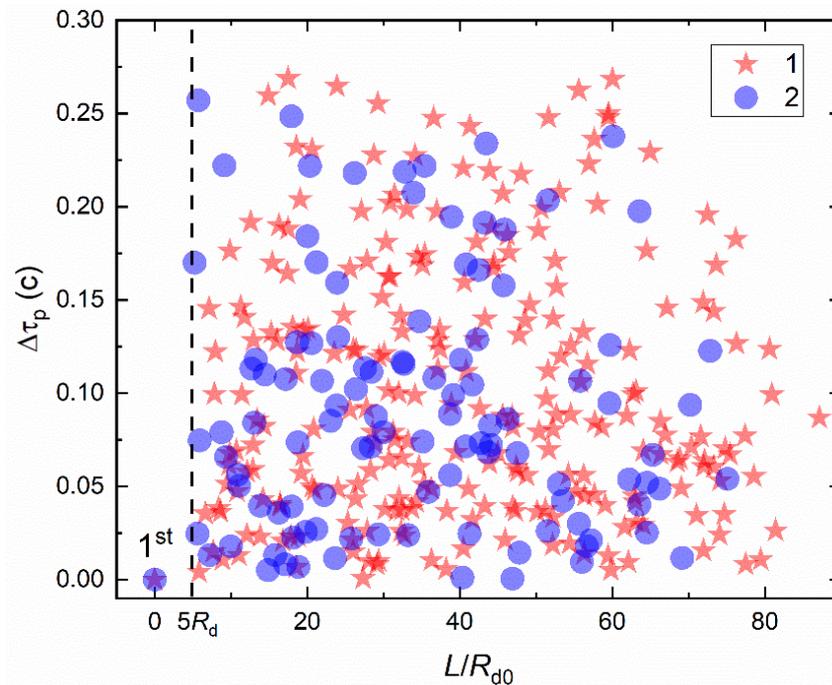


Рисунок 2.7.6.5 – Карта типичных режимов микро-взрывной фрагментации группы капель топливных эмульсий для различных соотношений L/R_{d0} и разницы времени задержки распада первой и последующих капель $\Delta\tau_p$ (построена на основе обобщения данных для группы капель топливных эмульсий на основе рапсового масла 90 % и воды 10 % при температуре в муфельной печи около 1223 К, начальные размеры капель перед распадом $R_{d0}=0.145\dots0.802$ мм). 1st – микро-взрывная фрагментация (1) или «паффинг» (2) первой капли в эксперименте.

Как можно видеть из рисунка 2.7.6.5 минимальное расстояние между соседними каплями, для которых регистрировались процессы микро-взрывного распада, составляет $\sim 5R_{d0}$. Также следует отметить, что при проведении экспериментов для группы капель характерны режимы диспергирования и микро-взрывной фрагментации, а также монотонное испарение (постепенное уменьшение размеров) без фрагментации. Последний режим регистрировался для капель в группе с малыми расстояниями между ними, т.е. когда капли идут достаточно близко (несколько характерных радиусов). Также важную роль играл тот фактор, что мелкие капли зажигались практически мгновенно вследствие высоких тепловых потоков.

В ходе проведения экспериментов с группой падающих двухжидкостных капель зарегистрированы следующие эффекты:

(а) в процессе движения группы капель реализуются различные режимы их фрагментации, т.е. помимо характерных одиночным каплям двух режимов («паффинг» и микро-взрывная фрагментация) регистрировались и некоторые комбинированные (последовательно и параллельно протекающие во времени). Например, после нескольких интенсивных фрагментаций исходной капли в режиме «паффинг» регистрировалась определенная временная пауза, за которой следовала микро-взрывная фрагментация, приводящая к ее полному распаду. Также зарегистрированы условия нескольких последовательных процессов «паффинг» для исходной и вторичных капель с последующим микро-взрывным распадом. При этом на видеокадрах хорошо видны различные режимы взаимодействия (соударений) между собой капель при столкновениях (классификация соответствует терминологии [153]): отскок (сближение, касание и удаление друг от друга), коагуляция (слияние в единый жидкостной фрагмент), дробление (распад капель с образованием мелких фрагментов). При этом данные режимы реализовывались как для исходных капель (существенно реже вследствие меньшего числа фрагментов), так и для вторичных капель (вследствие большего числа и существенно отличающихся размеров, скоростей и траекторий движения).

Следует отметить, что данные режимы носили вероятностный характер и наблюдались не во всех экспериментах. Вероятность соударения во многом зависела от расстояния между каплями, а также их концентрации в области регистрации. Также важную роль играл состав вторичных капель, т.е. относительная концентрация в них горючей и негорючей жидкости. Чем меньше была концентрация воды в составе вторичных капель, тем быстрее они прогревались и распадались (вследствие меньшей теплоемкости и теплоты парообразования горючей жидкости). Но главное условие для фрагментации вторичных капель состоит в том, чтобы вода осталась в составе вторичных капель, т.е. важно наличие границы раздела «вода/топливо», на которой реализуются условия локального перегрева воды. Если практически сразу после формирования некоторые вторичные капли зажигались в полете без интенсивной трансформации, то можно было сделать вывод о том, что в их составе не осталось воды. Установлено, что образующиеся при двух режимах распада («паффинг» и микро-взрывная фрагментация) вторичные фрагменты оказывают разное влияние на соседние капли. При реализации процессов «паффинг» число вторичных капель существенно меньше, но их размеры больше. Как следствие, кинетическая энергия таких фрагментов достаточно высока и приводит к существенной трансформации поверхности соседних капель, не прошедших этапы фрагментации. Регистрировались условия, при которых образованные после «паффинг» фрагменты на большой скорости соударялись с соседними каплями. Происходил разлет капель или их дробление. При малых скоростях движения вторичных капель последние должны были коагулировать с соседними, но вследствие интенсивного испарения последних и формирования вокруг них паровой буферной зоны их отбрасывало на периферию. При микро-взрывном распаде число вторичных капель на порядок выше, чем при «паффинг», и они формируются одновременно. Кадры видеogramм показывали достаточно мощную волну вторичных фрагментов из очага распада к стенкам камеры. Эта условная

волна способствовала не разрушению соседних капель, а их трансформации, вращению и частичной фрагментации.

(б) Достаточно интересные закономерности эшелонного зажигания капелек установлены при анализе видеок кадров. В частности, проведенные опыты показали, что зажигание капель после микро-взрывной фрагментации происходит на определенном расстоянии от зоны реализации этого процесса, т.е. часто вторичные капли проходили достаточно длительный участок в камере перед воспламенением. Нередко даже регистрировались условия соударения вторичных фрагментов со стенкой камеры и последующего их зажигания. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, на реализацию процессов прогрева капель, их испарения и микро-взрывной фрагментации расходуется достаточно много энергии. Во-вторых, в малой окрестности исходной капли вследствие интенсивного испарения жидкостей концентрация окислителя (воздуха) мала. Только после выхода вторичных капель из области, окружающей исходную каплю с радиусом, равным $(5-7) \cdot R_{d0}$, начинали регистрироваться первые вспышки. Если учитывать, что характерные скорости движения вторичных фрагментов составляют от 0.5 до 5 м/с, то они могут разлететься на указанные предельные расстояния их формирующегося при микро-взрывной фрагментации фронта менее чем за 0.01 с. Таким образом, в реальных технологиях зажигание вторичных фрагментов будет происходить практически сразу после их формирования. Этот процесс можно интенсифицировать при подаче в камеру разогретого окислителя, который при микро-взрывной фрагментации диффундирует на периферию камеры.

(в) При движении капель в группе было отмечено несколько устойчиво воспроизводимых от эксперимента к эксперименту закономерностей. Во-первых, капли, которые располагались ближе к стенкам муфельной печи, фрагментировали первыми. Это связано с тем, что вблизи стенок температура выше, чем в центральной части камеры (на оси ее симметрии). Как следствие, капли у стенки быстрее прогревались до температуры, при которой реализуется

микро-взрывное дробление. Во-вторых, при большой концентрации капель в области регистрации и относительно небольших расстояниях между ними ($<5R_{d0}$) процессы микро-взрывной фрагментации регистрировались достаточно редко, т.е. можно сделать вывод о том, чем больше расстояние между соседними каплями, тем выше вероятность микро-взрывной фрагментации. Скорее всего, это обусловлено тем, что в отличие от экспериментов с одиночными каплями (рис. 2.7.6.1-2.7.6.4), их совокупность прогревалась крайне неравномерно. Определенная доля подводимого радиационного теплового потока от стенок муфельной печи поглощалась каплями, которые располагались ближе к стенкам (т.е. на периферии относительно оси симметрии камеры). В [109] отмечено, что продольный размер парового следа капли (в котором температура и концентрация паров существенно изменяются относительно начальных значений у ее фронтальной поверхности) составляет $(5-7)R_{d0}$. В [154] на примере 2-5 капель органоводоугольных топлив показано, что изменение схемы их взаимного расположения и расстояний между ними могут приводить к отличию интегральных характеристик процессов прогрева, испарения и зажигания до 70%. Лишь при удалении капель топлив относительно друг друга на расстояния более $(3-6)R_{d0}$ взаимное влияние ослабевает. Можно сделать вывод о том, что полученные результаты опытов в целом хорошо согласуются с заключениями опытов с водой [109] и органоводоугольными топливами [154], сформулированными с акцентированием внимания на формирование паровой буферной зоны вокруг капель и влияние последней на условия и характеристики прогрева соседних. Установленные в настоящей диссертационной работе значения минимальных расстояний между каплями выше, чем в опытах [109], так как анализируется влияние на условия не только испарения, как в [109], но и на трансформацию поверхности капель, перегрев воды, распад капли. Эти процессы более сложные. Исключение влияния соседних капель на них требует больших расстояний между каплями или существенной полидисперсности аэрозоля, т.е. неоднородного распределения исходных капель по размерам.

(г) Образующиеся при микро-взрывном распаде вторичные капли за счет столкновений с рядом идущими каплями могут инициировать их фрагментацию. В проведенных опытах регистрировались условия, при которых практически сразу после контакта вторичных капель от первой исходной капли начинали фрагментировать несколько соседних. Выделенный эффект зарегистрирован для капель, в которых происходит интенсивный рост пузыря, т.е. процесс фрагментации инициировался за счет разрушения жидкостной оболочки пузыря. Для этого было достаточно касание даже мелких вторичных фрагментов.

(д) При выполнении сравнительного анализа времени задержки микро-взрывной фрагментации одиночных и совокупности двухжидкостных капель с идентичным начальным составом и в одинаковых условиях нагрева установлено, что имеются достаточно существенные отличия этих характеристик для капель, представляющих разные эшелоны (рис. 2.7.6.5). В частности, при анализе кадров фрагментации одиночных капель и группы из числа идущих в первом эшелоне установлены практически идентичные времена задержки (отличия не превысили погрешность их регистрации, т.е. 3%). Но такие условия зарегистрированы только при расстояниях между каплями (по поперечной координате относительной траектории их движения) более $5R_{d0}$. Таким образом, можно сделать вывод о том, что существенное влияние оказывают и расстояния между каплями в поперечных (относительно направления движения капель) сечениях камеры. Это главным образом связано с тем, что расположенные ближе к стенкам капли и образующиеся вокруг них парогазовые слои снижают подводимый тепловой поток к каплям, идущим в центральной части эшелона. Если же анализировать времена задержки совокупности капель, подаваемых последовательно в камеру сгорания, то при совпадении траекторий капель целесообразно выдерживать расстояние между эшелонами не менее $5R_{d0}$, чтобы времена задержки микро-взрывного распада были идентичными для капель в каждом из эшелонов. На основании отмеченных эффектов можно планировать методики и выбирать параметры работы систем распыления, при которых характеристики

фрагментации капель, идущих в разных эшелонах, будут соответствовать аналогичным характеристикам одиночных капель. В таких условиях можно использовать подход [87,155] для прогнозирования характеристик фрагментации как одиночных капель, так и аэрозоля. Если же не выдерживать определенные временные паузы между подачей эшелонов капель и, соответственно, расстояния между ними, то будут обеспечиваться условия нелинейного роста времени задержки микро-взрывной фрагментации каждой последующей капли. Если в реальной практике используются достаточно габаритные (протяженные) нагревательные камеры, то можно применять схемы с повышенной относительной концентрацией капель (соответственно, малыми расстояниями между ними). Но целесообразно принимать во внимание времена нахождения капель в таких камерах, т.е. движения от зоны впрыска до выхода, чтобы исключить циклическую подачу жидкости.

2.7.7 Обобщение результатов экспериментальных исследований для капель с разным размером дисперсной фазы (воды)

Как показали результаты экспериментальных исследований (раздел 2.7.4), так и результаты других авторов [9,15,74,86,156,157] технология формирования капель (эмульсии или двухжидкостные капли), а также размеры дисперсной фазы (воды) оказывают существенное влияние на характеристики микро-взрывной фрагментации (времена задержки распада, число и размеры вторичных фрагментов и т.д.). Кроме того, в процессе нагрева происходит коагуляция внутренних водяных капель с образованием крупного водяного ядра [9,15,74,86,156,157]. Важным с точки зрения применения полученных результатов экспериментальных исследований является их обобщение в виде безразмерных величин.

В разделе 2.7.7 обобщено большое количество экспериментальных данных, полученных при проведении исследований в рамках настоящей работы, и данных других авторов [9,15,74,86,156,157] для одиночных капель жидкостей с разным

начальным размером дисперсной фазы (воды): двухжидкостные капли, в которых слияние внутренних водяных капель уже достигнуто [76,130], характерный размер дисперсной фазы 50-500 мкм; высокодисперсные эмульсии, в которых в процессе нагрева наблюдается коагуляция внутренних водяных капель [15,52], характерный размер дисперсной фазы 4-8 мкм; тонкодисперсные эмульсии, предотвращающие эффекты коагуляции и расслаивания [15,52], характерный размер дисперсной фазы 1-1.2 мкм.

По результатам обработки видеок кадров сделана оценка частоты микро-взрывного распада (M-E success rate) для капель с разным размером дисперсной фазы (воды). Под частотой микро-взрывного распада (M-E success rate) понималось отношение количества экспериментов, в которых достигались условия фрагментации родительской капли с образованием мелких вторичных фрагментов размерами (радиусами) менее 10 мкм, к суммарному количеству проведенных экспериментов (от 10 до 60).

На рис. 2.7.7.1 представлены обобщенные экспериментальные данные для капель с разным размером дисперсной фазы (воды) в виде зависимости частоты микро-взрывного распада (M-E success rate) от величины $\ln(D_{in}/D_d)$, характеризующей отношение размера дисперсной фазы (воды) к начальному размеру родительской капли. Большое количество повторных измерений (от 10 до 60 экспериментов) для капель с разным начальным размером дисперсной фазы (воды) приводит к строгой зависимости увеличения частоты микро-взрывного распада с увеличением начального размера внутренних водяных капель. При этом тонкодисперсные и высокодисперсные эмульсии, как правило, ограничивались феноменом «паффинг», тогда как двухжидкостные капли всегда подвергались микро-взрывному распаду. Полученная зависимость (рис. 2.7.7.1) иллюстрирует, что начальный размер дисперсной фазы (воды) является важным параметром, влияющим на реализацию микро-взрывных эффектов, наряду с температурой внешней среды, концентрацией жидкостей, начальными размерами родительских капель и т.д.

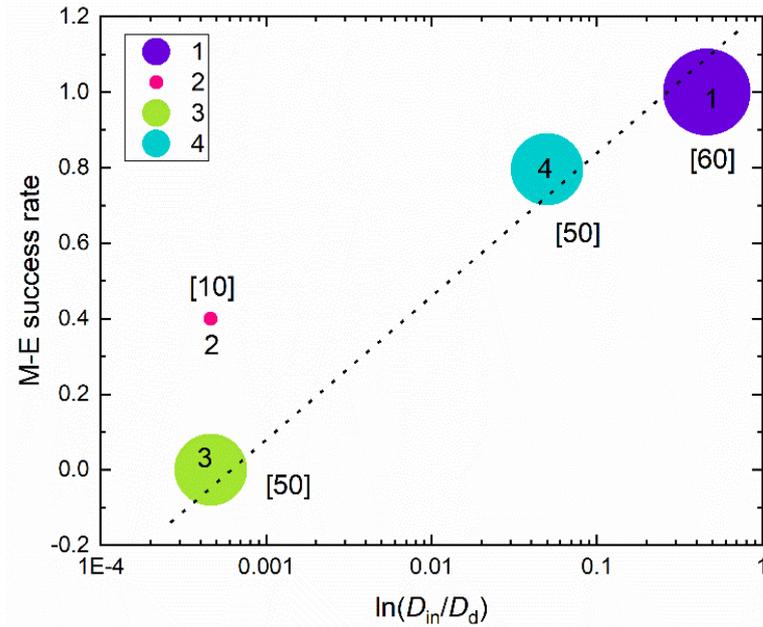


Рисунок 2.7.7.1 – Зависимость частоты (т.е. относительной вероятности) микро-взрывного распада капли (M-E success rate) от величины $\ln(D_{in}/D_d)$: 1 – двухжидкостные капли, характерный размер дисперсной фазы 50-500 мкм [76,130]; 2 – высокодисперсные эмульсии вода/дизельное топливо, характерный размер дисперсной фазы 4-8 мкм [86]; 3 – тонкодисперсные эмульсии, характерный размер дисперсной фазы 1-1.2 мкм [15,52]; 4 – высокодисперсные эмульсии вода/тетрадекан, характерный размер дисперсной фазы 4-8 мкм [15,52].

В квадратных скобках указано суммарное количество опытов.

При $\ln(D_{in}/D_d) \rightarrow 0$ условия микро-взрывного распада не достигаются из-за значительного увеличения стабильности топливной эмульсии [15], что приводит к резкому снижению показателя частоты микро-взрывного распада. В этом случае эмульсии достаточно устойчивы, чтобы активировать процессы коагуляции внутренних водяных капель. А в случае двухжидкостных капель изначально достигнуты условия полного слияния внутренних водяных капель, что приводит к максимальному значению частоты микро-взрывного распада капли (M-E success rate). Логарифмическая зависимость частоты микро-взрывного распада обозначена и в ранних исследованиях фрагментации топливных эмульсий, в частности, в [15].

Выводы по второй главе

1. Созданы экспериментальные стенды для исследования основных характеристик 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. Эксперименты на разработанных стендах позволили установить зависимости характеристик теплопереноса в рассматриваемых системах капля/высокотемпературная газовая среда от группы основных параметров системы (температуры греющей среды (300–1500 К), схемы нагрева (в потоке воздуха, на разогретой подложке, в муфельной печи, в пламени горелки), концентрации горючей жидкости (3–97 %), свойств (вязкости (0.00259–0.01668 Па·с), межфазного (0.00341–0.04257 Н/м) и поверхностного (0.0401–0.07269 Н/м) натяжения) и материала горючих жидкостей (вода, керосин, дизельное топливо, трансформаторное и рапсовое масло), размеров (0.5–1.5 мм) и технологии формирования капель (двухжидкостные капли и эмульгированные топлива), групповых эффектов).
3. Проведена оценка достоверности результатов экспериментальных исследований. Погрешности измерений представлены в виде доверительных интервалов на всех экспериментальных зависимостях. Доверительная вероятность при определении доверительных интервалов составляла 0.95.
4. 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.

5. Установлены отличия механизмов, режимов и характеристик процессов микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель и эмульгированных топлив. Так, например, капли эмульсий измельчаются в основном лишь в режиме «паффинг», а двухжидкостные капли в режиме микро-взрывной фрагментации с последующим получением мелкодисперсного аэрозоля.
6. Показано, что времена задержки микро-взрывного распада капель жидкостей значительно меньше (в 5–7 раз) аналогичных временных характеристик испарения однородных капель топлив со свободной поверхности.
7. Установлено, что при нагреве на подложке времена задержки микро-взрывного распада двухжидкостных капель существенно меньше, чем в потоке разогретых газов и муфельной печи, но число вторичных фрагментов ниже. В условиях нагрева на подложке рост площади поверхности испарения не превышал 10–20 раз.
8. 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 греющей среды (выше 1000 К), малым размерам капель (ниже 500 мкм) и высокой концентрации горючей жидкости (более 90 %).
9. Установлено, что чем выше вязкость эмульгированных капель и меньше значение межфазного и поверхностного натяжения, тем выше инерционность их прогрева до микро-взрывного распада. С учетом этих

особенностей можно обеспечить снижения времени задержки распада на 30-40 %.

10. Экспериментально исследованы коллективные эффекты микро-взрывного распада двухжидкостных капель в газовой среде. Установлены условия существенного влияния соседних капель на их прогрев, испарение и измельчение. В частности, зарегистрированы цепные механизмы фрагментации капель, идущих на расстоянии друг от друга более 9 характерных размеров.
11. Основные эффекты совместного влияния двухжидкостных капель на условия их микро-взрывного распада состояли в следующем: в процессе движения группы капель проявляются различные режимы взаимодействия капель при столкновениях; размеры капель уменьшаются за счет попадания на стенки муфельной печи на входе; существенную роль на условия прогрева и фрагментации при движении группы капель играет расстояние между каплями и удаленность от стенок муфельной печи; столкновение вторичных капель с рядом идущими каплями может инициировать микро-взрывная фрагментация последних.
12. 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 для тандема однородных капель [24,158].
13. Проведенные эксперименты, а также данные других авторов [9,15,74,86,156,157], позволили установить влияние $\ln(D_{in}/D_d)$ на частоту возникновения микро-взрывных эффектов для капель с разным размером дисперсной фазы (воды).

Глава 3. Теоретические исследования условий и характеристик микро-взрывного распада двухжидкостных капель

Ниже представлены результаты использования разработанных физических и математических моделей тепломассопереноса в двухжидкостной капле в условиях, предшествующих микро-взрывному распаду, и основанных на применении трех критериев: достижение температуры дисперсной фазы (воды) на границе раздела «вода/топливо» значений, соответствующих температуре начала взрывного кипения; превышение критических значений размеров (радиусов) пузырей или объединенного пузыря в капле; превышение давления в паровой пленке.

3.1 Известные физические постановки задач тепломассопереноса для изучения фрагментации капель

Большинство известных работ, посвящённых теоретическим исследованиям процессов микро-взрывного распада капель жидкостей в газовой среде, используют при моделировании специализированные математические пакеты. К наиболее часто применяемым численным методам решения такого рода задач относятся метод VOF (Volume of Fluid) [159–161], метод DNS (Discrete Numerical Simulation) [74,162,163]. Также нередко проводятся исследования закономерностей микро-взрывного распада двухжидкостных капель с использованием индивидуальных программных кодов [73,87,90].

Следует отметить, что в моделях со схемами областей решения, аналогичными представленным в [73,74,87,90,159–163], как правило, предполагается наличие границ раздела, т.е. границ переходов между горючей и негорючей жидкостями. Эффекты растворения (т.е. перемешивания) одной из жидкостей в другой не учитываются. Фактор задания границ между горючей и негорючей жидкостями является определяющим, так как физическая причина микро-взрывной фрагментации состоит в перегреве воды на границе раздела «вода/топливо» выше ее температуры кипения. Эти критические условия

обоснованы в ряде экспериментов, в частности, в [76] при использовании оптического метода PLIF. В случае двухжидкостных капель имеется одна граница между водой и горючей жидкостью, а при нагреве капель эмульсий таких границ достаточно много, так как маленькие внутренние капельки воды распределены во всем объеме горючей жидкости.

Широко применяемые в настоящее время модели микро-взрывного распада, например, [57,74,125,162,163], имеют определённые ограничения, связанные с сильной зависимостью получаемых результатов расчетов от входных экспериментальных данных, а также исключением из рассмотрения некоторых процессов и эффектов по причине отсутствия адекватных экспериментальных сведений или сложностей вычислений. Известны специфические факторы и процессы (основные обсуждены в [73]), сдерживающие создание более общей модели микро-взрывного распада капель, в том числе и связи механизмов с последствиями распада. По этим причинам перспективным представляется выполнение теоретических исследований процессов прогрева, испарения, разбухания и микро-взрывного распада капель жидкостей с использованием группы наиболее типичных предельных условий разрушения (так называемого вторичного измельчения): по достижению температуры дисперсной фазы (воды) на границе раздела значений, соответствующих температуре начала взрывного кипения; по превышению критических значений размеров (радиусов) пузырей или объединенного пузыря в капле; по превышению давления в паровой пленке.

3.2 Математические модели и методы решения

3.2.1 Модель тепломассопереноса в двухжидкостной капле в условиях, предшествующих микро-взрывному распаду, по перегреву границы раздела «вода/топливо» выше температуры кипения воды

Схема области решения задачи по изучению фрагментации двухжидкостной капли, основанной на критерии перегрева границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения, показана на рисунке 3.2.1.1. Модель основана на предположении о том, что сферическая капля воды представляет ядро и располагается по центру, а топливо – оболочку.

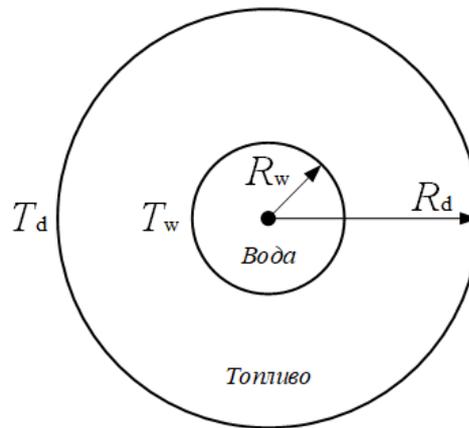


Рисунок 3.2.1.1 – Схема области решения задачи по изучению фрагментации двухжидкостной капли, основанной на критерии перегрева границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения, где R_w и R_d – радиус капли воды и топлива. T_w и T_d – температура на границе вода/топливо и температура в приповерхностном слое капли.

Температурное распределение в двухжидкостной капле в пространстве и времени описывается уравнением энергии в сферической системе координат (3.2.1.1) с граничными условиями (3.2.1.3)-(3.2.1.5), аналогично [90]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + P(t, R), \quad (3.2.1.1)$$

где

$$\kappa = \begin{cases} \kappa_w = k_w / (c_w \rho_w) \text{ при } R \leq R_w \\ \kappa_f = k_f / (c_f \rho_f) \text{ при } R_w < R \leq R_d \end{cases}, \quad (3.2.1.2)$$

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

$$T(t=0) = \begin{cases} T_{w0}(R) \text{ при } R \leq R_w \\ T_{f0}(R) \text{ при } R_w < R \leq R_d \end{cases}, \quad (3.2.1.3)$$

$$T|_{R=R_w^-} = T|_{R=R_w^+}, \quad k_w \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_w^-} = k_f \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_w^+}, \quad (3.2.1.4)$$

$$h(T_{\text{eff}} - T(R_d)) = k_f \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_d-0}, \quad (3.2.1.5)$$

где h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

$$T_{\text{eff}} = T_g + \frac{\rho_f L \dot{R}_{d(e)}}{h}, \quad (3.2.1.6)$$

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. Условия (3.2.1.3) и (3.2.1.4) выполняются при $T_{w0}(R_w) = T_{f0}(R_w)$.

Скорости испарения описывались с использованием выражения [164], которое часто называют выражением Стефана – Фукса [165], ссылаясь на тот факт, что эта модель впервые введена Фуксом [113] и основана на концепции потока Стефана:

$$\dot{m}_{d(e)} = -4\pi R_d D_v \rho_{\text{total}} \ln(1 + B_M). \quad (3.2.1.7)$$

Преобразовав выражение (3.2.1.7), получается выражение (3.2.1.8) для $\dot{R}_{d(e)}$:

$$\dot{R}_{d(e)} = -\frac{D_v \rho_{\text{total}} \ln(1 + B_M)}{R_d}, \quad (3.2.1.8)$$

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

Коэффициент теплоотдачи h определялся как:

$$h = \frac{k_g \text{Nu}}{2R_d}, \quad (3.2.1.9)$$

где Nu – число Нуссельта, которое определялось как (3.2.1.10):

$$\text{Nu} = 2 \frac{\ln(1 + B_T)}{B_T}, \quad (3.2.1.10)$$

где B_T – тепловое число Сполдинга, которое определялось как (3.2.1.11):

$$B_T = \frac{c_{pv}(T_g - T_s)}{L(T_s) - \left(\left| \dot{q}_d \right| / \dot{m}_{d(e)} \right)}, \quad (3.2.1.11)$$

где $\left| \dot{q}_d \right|$ – тепловой поток, подводимый к капле.

Для покоящихся капель, B_T и B_M связаны выражением (3.2.1.12) [164]:

$$B_T = (1 + B_M)^\varphi - 1, \quad (3.2.1.12)$$

где

$$\varphi = \left(\frac{c_{pv}}{c_{pg}} \right) \frac{1}{\text{Le}}, \quad (3.2.1.13)$$

$$\text{Le} = \frac{k_g}{c_{pg} \rho_{total} D_v}. \quad (3.2.1.14)$$

Уравнение в частных производных второго порядка (3.2.1.1) с граничными условиями третьего и четвертого рода (3.2.1.3)-(3.2.1.5) решалось аналитически с использованием метода разделения переменных, позволяющего перейти от сложной формы дифференциальных уравнений к простым алгебраическим

выражениям [164]. Основные выкладки аналитического решения задачи представлены в [90,166] и описаны ниже.

$$T = \frac{1}{R_d \xi} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \Theta_n(t) v_n(\xi) + \frac{\mu_0 \xi}{1+h_0} \right], \quad (3.2.1.15)$$

где

$$\Theta_n(t) = (q_n + f_n \mu_0) \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 t}{R_d^2}\right) + \frac{p_n}{\lambda_n^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 t}{R_d^2}\right) \right], \quad (3.2.1.16)$$

$$f_n = \frac{1}{\|v_n\|^2} \int_0^1 f(\xi) v_n(\xi) b d\xi = \frac{1}{\|v_n\|^2} \left\{ \int_0^{\xi_w} \frac{-\xi}{1+h_0} \frac{\sin(\lambda_n a_w \xi)}{\sin(\lambda_n a_w \xi_w)} k_w a_w^2 d\xi + \int_{\xi_w}^1 \frac{-\xi}{1+h_0} \frac{\sin(\lambda_n a_f \xi + \beta_n)}{\sin(\lambda_n a_f \xi_w + \beta_n)} k_f a_f^2 d\xi \right\}, \quad (3.2.1.17)$$

$$q_n = \frac{1}{\|v_n\|^2} \int_0^1 F_0(\xi) v_n(\xi) b d\xi = \frac{1}{\|v_n\|^2} \left\{ \int_0^{\xi_w} R_d \xi T_0(R_d \xi) \frac{\sin(\lambda_n a_w \xi)}{\sin(\lambda_n a_w \xi_w)} k_w a_w^2 d\xi + \int_{\xi_w}^1 R_d \xi T_0(R_d \xi) \frac{\sin(\lambda_n a_f \xi + \beta_n)}{\sin(\lambda_n a_f \xi_w + \beta_n)} k_f a_f^2 d\xi \right\}, \quad (3.2.1.18)$$

$$p_n = \frac{1}{\|v_n\|^2} \int_0^1 R_d^3 \xi \bar{P}(\xi) v_n(\xi) b d\xi = \frac{1}{\|v_n\|^2} \left\{ \int_0^{\xi_w} R_d^3 \xi \bar{P}(\xi) \frac{\sin(\lambda_n a_w \xi)}{\sin(\lambda_n a_w \xi_w)} k_w a_w^2 d\xi + \int_{\xi_w}^1 R_d^3 \xi \bar{P}(\xi) \frac{\sin(\lambda_n a_f \xi + \beta_n)}{\sin(\lambda_n a_f \xi_w + \beta_n)} k_f a_f^2 d\xi \right\}, \quad (3.2.1.19)$$

$$f(\xi) \equiv \frac{-\xi}{1+h_0} = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) v_n(\xi), \quad (3.2.1.20)$$

$$F_0(\xi) \equiv R_d \xi T_0(R_d \xi) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) v_n(\xi), \quad R_d^3 \xi \bar{P}(\xi) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n(t) v_n(\xi), \quad (3.2.1.21)$$

$$v_n(\xi) = \begin{cases} \frac{\sin(\lambda_n a_w \xi)}{\sin(\lambda_n a_w \xi_w)} & \text{when } 0 \leq \xi \leq \xi_w, \\ \frac{\sin(\lambda_n a_f \xi + \beta_n)}{\sin(\lambda_n a_f \xi_w + \beta_n)} & \text{when } \xi_w \leq \xi \leq 1, \end{cases} \quad (3.2.1.22)$$

где β_n – значение β при $\lambda = \lambda_n$.

$$\begin{aligned} \|v_n\|^2 = \int_0^1 v_n^2 b d\xi = & \frac{\sqrt{c_w \rho_w k_w}}{\lambda_n \sin^2(\lambda_n a_w \xi_w)} \left[\frac{a_w \lambda_n \xi_w}{2} - \frac{\sin(2a_w \lambda_n \xi_w)}{4} \right] \\ & + \frac{\sqrt{c_f \rho_f k_f}}{\lambda_n \sin^2(\lambda_n a_f \xi_w + \beta_n)} \left\{ \frac{a_f \lambda_n (1 - \xi_w)}{2} - \right. \\ & \left. - \frac{\sin(2\lambda_n a_f + 2\beta_n) - \sin(2\lambda_n a_f \xi_w + 2\beta_n)}{4} \right\}, \end{aligned} \quad (3.2.1.23)$$

$$\beta = \cot^{-1} \left[\frac{k_f - k_w}{k_f a_f \xi_w \lambda} + \frac{k_w a_w}{k_f a_f} \cot(a_w \lambda \xi_w) \right] + i\pi - a_f \lambda \xi_w, \quad (3.2.1.24)$$

где $i=0,1,2,3, \dots$. Рассмотрен частный случай, когда $i=0$, при других i значения v будут такими же, но это значительно усложнит процедуру расчетов [90].

Счетный набор положительных собственных значений λ_n получается из граничного условия при $\xi = 1$:

$$\lambda_n a_f \cos(\lambda_n a_f + \beta) + h_0 \sin(a_w \lambda \xi_w) = 0. \quad (3.2.1.25)$$

Ниже приведены пояснения к новым переменным, введенным в ходе аналитического решения методом разделения переменных:

$$\begin{aligned}
H &= \frac{h}{k_f} - \frac{1}{R_d}, \mu = \frac{R_d}{k_f} \left(hT_g + \rho_1 L_f \dot{R}_{d(e)} \right), \\
\xi &= R / R_d, \bar{P}(\xi) = P(\xi R_d), \\
F(t, \xi) &= u(t, R) \equiv T(R, t) R, h_0 = HR_d = \frac{hR_d}{k_f} - 1, \\
\mu_0 &= \mu R_d = \frac{R_d^2}{k_f} \left(hT_g + \rho_1 L_f \dot{R}_{d(e)} \right) = \frac{R_d^2 h T_{\text{eff}}}{k_f}.
\end{aligned} \tag{3.2.1.26}$$

Значение b определялось как:

$$b = \begin{cases} k_w a_w^2 = \rho_w & \text{when } 0 \leq \xi \leq \xi_w, \\ k_f a_f^2 = \rho_f & \text{when } \xi_w \leq \xi \leq 1. \end{cases} \tag{3.2.1.27}$$

Эффекты теплового расширения, приводящие к изменению размера (радиуса) капли, учитывались на каждом временном шаге в соответствии с требованиями закона сохранения массы воды и жидкого топлива в процессе нагрева и определялись как:

$$R_{w1} = R_{w0} \left(\frac{\rho_{w0}}{\rho_{w1}} \right)^{1/3}, \tag{3.2.1.28}$$

$$\frac{4}{3} \pi (R_{d0}^3 - R_{w0}^3) \rho_{f0} = \frac{4}{3} \pi (R_{d1}^3 - R_{w1}^3) \rho_{f1}, \tag{3.2.1.29}$$

где индексы: 0 – в начале шага по времени; 1 – в конце шага по времени.

$$\Delta R_{d(s)} \equiv R_{d1} - R_{d0} = R_{d0} \left\{ \left[\left(1 - \frac{R_{w0}^3}{R_{d0}^3} \right) \frac{\rho_{f0}}{\rho_{f1}} + \frac{R_{w0}^3}{R_{d0}^3} \frac{\rho_{w0}}{\rho_{w1}} \right]^{1/3} - 1 \right\}. \tag{3.2.1.30}$$

где индекс s – изменение размера (радиуса) капли в связи с эффектами теплового расширения.

Суммарное изменение размера (радиуса) капли с учетом эффектов теплового расширения и испарения определялись как:

$$\Delta R_{d(t)} = \Delta R_{d(s)} + \Delta R_{d(e)}, \tag{3.2.1.31}$$

где

$$\Delta R_{d(e)} = \left(\frac{\dot{m}_{d(e)}}{4\pi R_{d0}^2 \rho_{f0}} \right) \Delta t, \Delta t = t_1 + t_0. \quad (3.2.1.32)$$

Внутренний источник тепла $P(R) = P(\xi R_d) = \bar{P}(\xi)$, используемый в уравнении (3.2.1.19), представляет собой функцию от координаты R и позволяет учесть в настоящем исследовании тепловые эффекты от держателя капли. Как следует из экспериментальных наблюдений, описанных в [77,167], держатель капли играет важную роль при ее нагреве. Строгий подход к моделированию нагрева капли при наличии держателя должен быть основан на трехмерном моделировании проблемы гидродинамики и теплообмена с учетом как капли, так и ее держателя [168]. Но в рамках данной работы внимание сосредоточено на гораздо более простом способе учета тепловых эффектов от держателя, который позволяет получить менее точные, но надежные оценки этого эффекта с использованием подхода, предложенного в [167].

Тепловой поток от держателя оценивался с использованием выражения (3.2.1.33):

$$q = \frac{k_f (T_{\text{sup}} - T_c)}{R_d} S_c, \quad (3.2.1.33)$$

где k_f – теплопроводность топливной оболочки, T_c – температура в центре капли, T_{sup} – температура поверхности держателя, R_d – радиус капли, S_c – площадь контакта капли с держателем.

Допустим, что тепло, подводимое к капле через держатель, равномерно распределяется по всему объему. В этом случае количество тепла, подводимого к капле, в единицу объема можно оценить, как (3.2.1.34):

$$q_v = \frac{3k_f (T_{\text{sup}} - T_c)}{4\pi R_d^4} S_c. \quad (3.2.1.34)$$

Допущение (3.2.1.34) позволяет оценить тепловые эффекты от держателя по формуле (3.2.1.35):

$$P(R) = \frac{3k_f(T_{\text{sup}} - T_c)}{4\pi c_f \rho_f R_d^4} S_c, S_c = \pi d_h R_d, \quad (3.2.1.35)$$

где d_h – внешний диаметр держателя.

При расчетах топливо аппроксимировалось доминирующим компонентом в составе основного топлива (керосина, дизельного топлива или рапсового масла) в соответствии с данными из табл. 2.3.1. Времена задержки микро-взрывного распада определялись с использованием критерия по перегреву границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения воды.

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 [73]. 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 [79,80,169]. Для гомогенного зародышеобразования таким источником активации является небольшая часть молекул с энергией, значительно превышающей среднюю [170]. 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. [90]. Типичный рассеянный характер явления зародышеобразования можно увидеть на рис. 3.2.1.2.

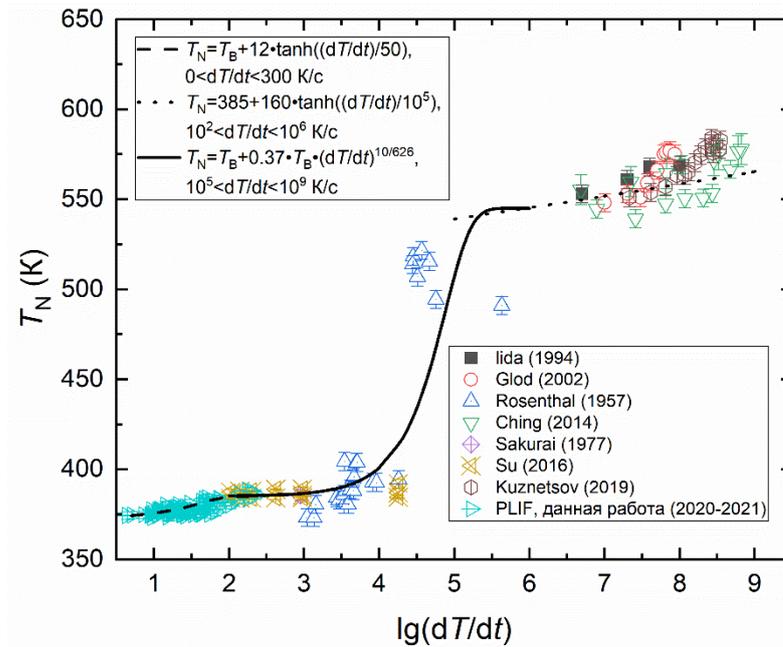


Рисунок 3.2.1.2 – Значения температуры начала взрывного кипения воды T_N при разных скоростях нагрева. Экспериментальные точки: Iida (1994) [171], Glod (2002) [172], Rosenthal (1957) [173], Ching (2014) [174], Sakurai (1977) [175], Su (2016) [176], Kuznetsov (2019) [81], PLIF (2020-2021) [90].

При очень высоких скоростях нагрева на реализацию условий пузырькового кипения с меньшей вероятностью будет влиять морфология поверхности, как показано в [177]. Напротив, гетерогенное зародышеобразование будет зависеть от геометрических характеристик границы раздела «вода/топливо». Загрязнения (твердые частицы, пузырьки газа) имеют доминирующее влияние в области низких скоростей нагрева. Режим нуклеации, подобный гомогенному режиму, в двухжидкостных каплях достигается при гетерогенном режиме нуклеации около границы раздела «вода/топливо». В настоящем исследовании сделано предположение, что все события микро-взрывного распада инициируются на границе раздела «вода/топливо». Это предположение обосновано тем, что в экспериментах настоящего исследования скорости нагрева двухжидкостных капель не превышают 300 К/с и пузырьки пара инициируются на готовых центрах парообразования, а именно на неровностях границы раздела «вода/топливо» (рис. 3.2.1.3).

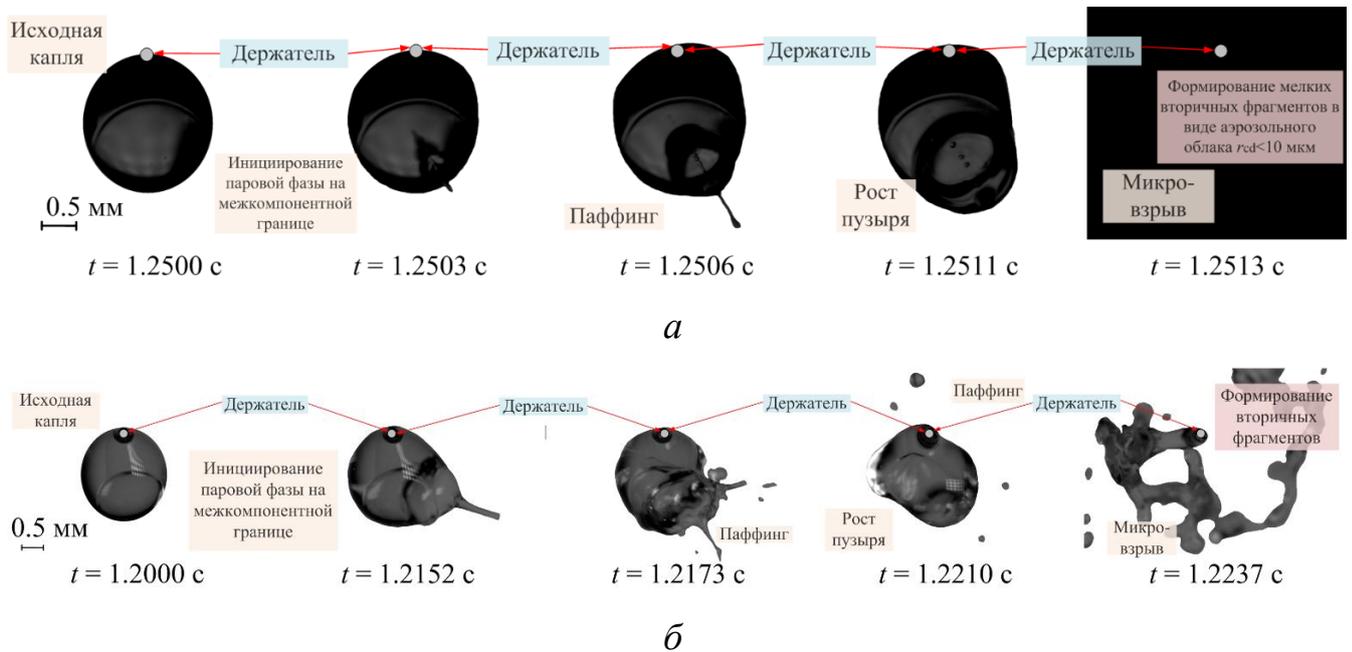


Рисунок 3.2.1.3 – Типичные видеокadres процессов фрагментации двухжидкостной капли. (а): $T_g \approx 850$ К; $R_{d0} \approx 0.9$ мм; $\eta_w \approx 15$ %. (б): $T_g \approx 850$ К; $R_{d0} \approx 0.9$ мм; $\eta_w \approx 10$ %.

Сравнение значений температур зародышеобразования от скорости нагрева для экспериментальных данных, полученных в настоящем исследовании (раздел 2), в диапазоне скоростей нагрева от 0 до 300 К/с показаны на рис. 3.2.1.4. Кроме того, на рис. 3.2.1.4 представлены данные других авторов [171–176] для скоростей нагрева до 300 К/с. Значения температуры начала взрывного кипения для воды T_N получены как температура воды границе раздела «вода/топливо» в момент микро-взрывной фрагментации $T_N = T_w(\tau_p)$, при котором происходил отрыв вторичных фрагментов. Показано, что с увеличением скорости нагрева двухжидкостных капель разница между температурой начала взрывного кипения воды и равновесной температурой ее кипения (373.15 К) на границе раздела «вода/топливо» перед распадом возрастает.

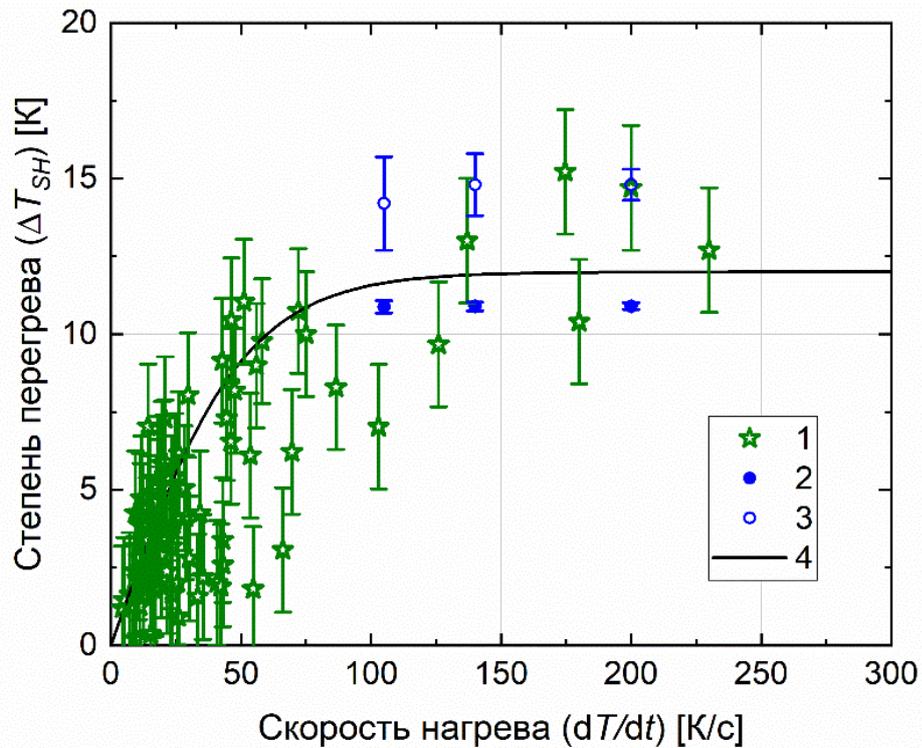


Рисунок 3.2.1.4 – Значения степени перегрева $\Delta T_{SH} = T_N - T_B$ в экспериментах с двухжидкостными каплями, полученные методом PLIF (1), и в экспериментах авторов Su et al. (2016) (2, 3) [176]. Кривая (4) построена по аппроксимационному выражению (3.2.1.36).

Из рис. 3.2.1.4 хорошо видно удовлетворительное согласие экспериментальных результатов, полученных в данном исследовании и данных других авторов [171–176]. Установленные значения степени перегрева ΔT_{SH} (примерно до 15 К) следует принимать во внимание при моделировании явлений микро-взрывной фрагментации. Аппроксимационное выражение для экспериментальных точек на рис. 3.2.1.4 имеет вид:

$$\Delta T_{SH} = T_N - T_B = 12 \cdot \tanh\left(\frac{dT}{dt} / 50\right), 0 \leq \left(\frac{dT}{dt}\right) \leq 300 \text{ K/s}, \quad (3.2.1.36)$$

где (dT/dt) – скорость нагрева в К/с.

Теплофизические свойства воды и топлива при расчетах принимались как зависимости от температуры из [133]. Начальная температура двухжидкостных капель составляла 300 К в соответствии с экспериментами [87].

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. 3.2.1.5 представлены примеры температурных распределений внутри двухжидкостной капли в разные моменты времени по результатам теоретических исследований с использованием математической постановки (рис. 3.2.1.1). Результаты расчетов проведены при следующих параметрах: (а) – капля вода/дизельное топливо, $T_{d0}=300$ К, $P_{amb}=101325$ Па, $R_{d0}=5$ мкм, $T_a=1000$ К, $\eta_w=10$ %; (б) – капля вода/дизельное топливо, $T_{d0}=300$ К, $P_{amb}=101325$ Па, $R_{d0}=500$ мкм, $T_a=1000$ К, $\eta_w=10$ %. Хорошо видно (рис. 3.2.1.4), что с течением времени на определённом временном шаге достигаются условия микро-взрывной фрагментации по температуре начала взрывного кипения воды на границе раздела «вода/топливо» как в случае капель с размерами (радиусами) $R_{d0}=5$ мкм, так и в случае $R_{d0}=500$ мкм. При этом, чем выше скорости нагрева каплю, тем больше разница между температурой начала взрывного кипения воды T_N и равновесной температуры воды $T_B=373.15$ К.

Со времен толщина пленки горючей жидкости (топлива) постепенно уменьшается в связи с эффектами испарения двухжидкостной капли, но до момента микро-взрывного распада не достигает своего критического размера при полном испарении, т.к. время микро-взрывной фрагментации во много раз меньше времени полного испарения.

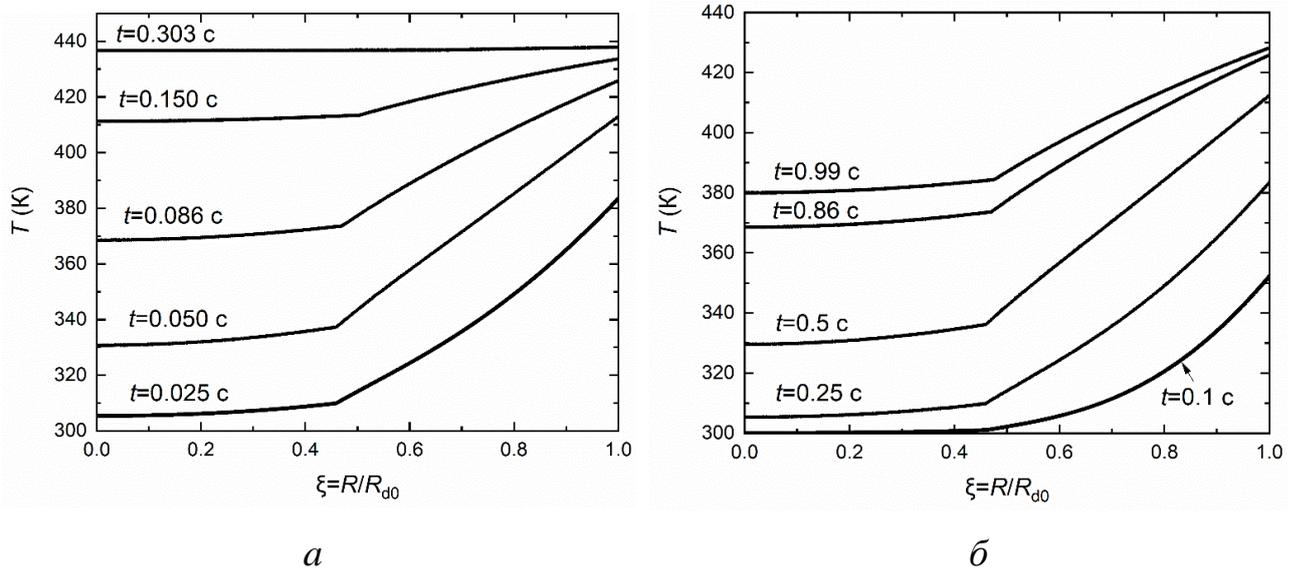


Рисунок 3.2.1.5 – Примеры температурных распределений внутри двухжидкостной капли в разные моменты времени по результатам математического моделирования (рис. 3.2.1.1): (а) – капли вода/дизельное топливо, $T_{d0}=300$ К, $P_{amb}=101325$ Па, $R_{d0}=5$ мкм, $T_a=1000$ К, $\eta_w=10$ %; (б) – капли вода/дизельное топливо, $T_{d0}=300$ К, $P_{amb}=101325$ Па, $R_{d0}=500$ мкм, $T_a=1000$ К, $\eta_w=10$ %.

3.2.2 Модель тепломассопереноса до условий микро-взрывного распада по критическому размеру (радиусу) пузыря

Схема области решения задачи по изучению фрагментации капли, основанной на критерии достижения критического размера (радиуса) пузыря, показана на рисунке 3.2.2.1. Модель основана на предположении, что в центре водяного ядра концентрируется паровой пузырь, а капля топлива представляет собой оболочку. Данная модель позволяет прогнозировать времена между временем полного распада и временем задержки микро-взрывного распада (3.2.2.1):

$$\tau_{\text{bubble}} = \tau_{\text{full}} - \tau_p. \quad (3.2.2.1)$$

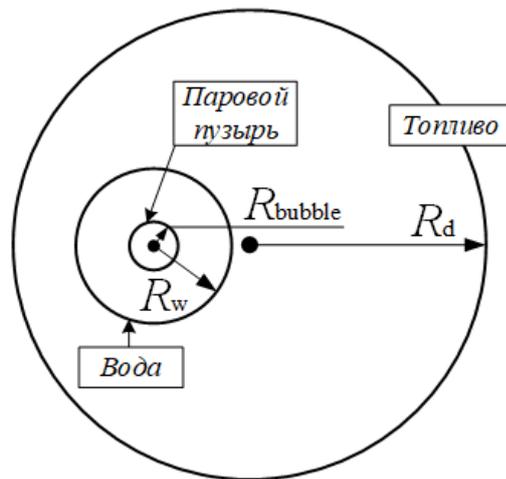


Рисунок 3.2.2.1 – Схема области решения задачи по изучению фрагментации капли, основанной на критерии по критическому размеру (радиусу) пузыря, где R_{bubble} , R_w и R_d – радиус пузыря, капли воды и топлива.

При решении задачи 2 (рис. 3.2.2.1), где в качестве критерия микро-взрывного распада принят критический размер (радиус) пузыря, применялся метод 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 (Volume of Fluid). Метод VOF разработан учеными Hirt и Nichols в 1981 году [178]. 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 [179].

Суммарный объем всех фаз в каждой ячейке равнялся 1 в соответствии с уравнением (3.2.2.2), где N_p – число фаз, i – номер фазы, F – объемная доля жидкой фазы:

$$\sum_{i=1}^{N_p} F_i = 1 \quad (3.2.2.2)$$

Поскольку свободная поверхность движется вместе с жидкостью, отслеживание перемещения свободной границы в пространстве осуществляется при решении уравнения переноса объемной доли жидкой фазы в ячейке [179].

Уравнение переноса объемной доли жидкой фазы в ячейке (3.2.2.3):

$$\frac{\partial F_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} F_i) = \frac{\dot{m}_i}{\rho}, \quad (3.2.2.3)$$

где i – номер фазы; F – объемная доля жидкой фазы; t – время, с; ∇ – оператор набла; \vec{v} – вектор скорости, м/с; \dot{m} – скорость межфазного переноса, кг/(м³·с); ρ – плотность, кг/м³.

Уравнение момента решается для всей области и всего времени расчёта, зависит от свойств жидких фаз (плотности ρ и динамической вязкости μ) в соответствии с уравнением (3.2.2.4):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) \right] + \rho \vec{g} + f_v, \quad (3.2.2.4)$$

где t – время, с; ρ – плотность, кг/м³; \vec{v} – вектор скорости, м/с; ∇ – оператор набла; p – давление, Па; μ – динамическая вязкость, Па·с; g – ускорение свободного падения, м²/с; f_v – источник силы поверхностного натяжения, Н/м³.

Источник силы поверхностного натяжения f_v рассчитывался с использованием CSF модели, разработанной Брэкбиллом в [180] с использованием уравнения (3.2.2.5):

$$f_v = \sigma_{ij} \frac{F_i \cdot \rho_i \cdot \kappa_i \cdot \nabla F_i + F_j \cdot \rho_j \cdot \kappa_j \cdot \nabla F_j}{0.5(\rho_i + \rho_j)}, \quad \kappa_{s,i} = -\kappa_{s,j} = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla F_i}{|\nabla F_i|} \right), \quad (3.2.2.5)$$

где i – номер жидкой фазы; j – номер газовой фазы; F – объемная доля жидкой фазы; ∇ – оператор набла; ρ – плотность, кг/м³; σ – поверхностное натяжение, Н/м; κ – кривизна поверхности, 1/м.

Уравнение энергии описывалось с использованием выражения (3.2.2.6):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + P(R, t), \quad (3.2.2.6)$$

где t – время, с; ρ – плотность, кг/м³; E – энергия, Дж; \vec{v} – вектор скорости, м/с; ∇ – оператор набла; p – давление, Па; k_{eff} – теплопроводность, Вт/(м·К); T – температура, К; $P(R, t)$ – дополнительный источник тепла.

Теплофизические, термодинамические и реологические свойства веществ при моделировании принимались при начальной температуре каплей $T_{\text{до}}=300$ К в соответствии с данными, представленными в табл. 2.3.1. Расчетная физическая геометрия модели с сеткой состояла из 13237 элементов и 7280 узлов.

В ходе проведения экспериментов (глава 2) зарегистрировано, что процессу микро-взрывной фрагментации предшествует увеличение капли в размерах, что объясняется зарождением и ростом пузырьков в течение короткого интервала времени. С помощью высокоскоростной видеокамеры контролировалась скорость изменения радиуса пузыря пара в исследуемой капле в течение всего времени её существования. По результатам экспериментов определялся критический размер пузыря, при котором происходил микро-взрывной распад. На рис. 3.2.2.2 продемонстрированы типичные зависимости размера (радиуса) пузыря от времени нагрева исследуемой капли (вода/рапсовое масло, 10 % воды). Как видно из рис. 3.2.2.2, критический размер пузыря составляет 1.75 мм, вследствие чего капля увеличивается в размерах более чем в 2 раза.

Критерий микро-взрывного распада капли для второй модели основан на слежении за предельным радиусом пузыря R_{bubble} , полученным из экспериментов (на видеogramмы добавлялась сетка для непрерывного контроля размеров пузыря). Применение критерия микро-взрыва по достижению критического размера (радиуса) пузыря справедливо для капель сферической формы и для случая размещения пузыря в их центре в схеме области решения задачи. Критерий критического размера пузыря связан с достижением определенной критической толщины пленки жидкости вокруг него (δ_f). В частности, в проведенных экспериментах установлено, что критическая толщина пленки жидкости, достаточная для микро-взрывного распада, составила 0.06–0.07 мм.

Если же капли имеют несферическую форму или пузырь зарождается ближе к свободной их поверхности относительно центра масс, то нужно учитывать достижение значений критической толщины пленки жидкости вместо критического размера парового пузыря (рис. 3.2.2.2).

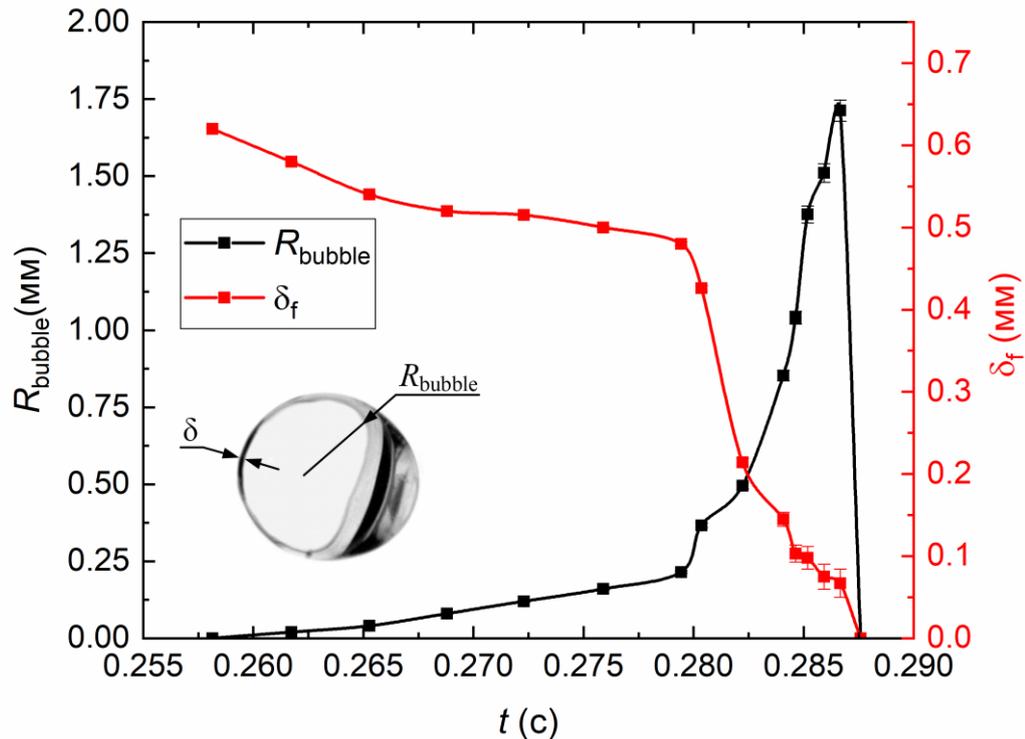


Рисунок 3.2.2.2 – Типичные зависимости размера (радиуса) пузыря от времени нагрева исследуемой капли ($T_a \approx 1223$ К, $R_{d0} \approx 0.84$ мм, вода/рапсовое масло, 10 % воды).

В зависимости от условий экспериментов формирующиеся капли могут быть сферическими или иметь форму эллипсоидов. Как следствие, при моделировании процессов микро-взрывной фрагментации целесообразно учитывать фактор формы капли и начального положения (зарождения) в ней пузыря. Так как в большинстве экспериментов капли интенсивно трансформируются в процессе полета и последовательно принимают формы «вытянутый эллипсоид – сфера – сплюснутый эллипсоид – сфера» (т.е. проходят определенные циклы деформации), то для приближения результатов моделирования к экспериментальным данным можно выполнить вычисления при

разных наблюдаемых в опытах формах и усреднить полученные значения характеристик. Фактор формы капле существенно влияет на интегральные характеристики микро-взрывного распада капле не только по тому, что критические значения толщины пленки жидкости достигаются быстрее при сплющивании или растяжении капли с пузырьем. Существенную роль оказывает рост силы аэродинамического сопротивления, в частности, значения коэффициента аэродинамического сопротивления для сферической и эллипсоидальной форм капле отличаются в 1.4–1.7 раз [181]. Чем выше силы инерции, действующие на каплю, тем интенсивнее деформация ее поверхности в газовой среде. Нагрев жидкости усиливает выделенную деформацию [181]. Эти условия дополнительно интенсифицируют микро-взрывную фрагментацию разогретых капле.

Параметр, характеризующий предельный размер (радиус) пузыря, определялся в соответствии с выражением (3.2.2.7):

$$K = \frac{R_{\text{bubble}}}{R_{\text{d0}}} = 2 - 3. \quad (3.2.2.7)$$

Важным условием образования и роста пузыря в исследуемой капле являлось достижение степени перегрева в соответствии с выражением (3.2.2.8):

$$T_{\text{cell}} \geq T_{\text{B}} + \Delta T_{\text{SH}}, \quad (3.2.2.8)$$

где T_{cell} – температура в ячейке, К; T_{B} – температура кипения, К; ΔT_{SH} – степень перегрева из (3.2.1.36), К.

Пузырь начинает расти после нарушения баланса сил, описываемого уравнением Юнга-Лапласа (3.2.2.9), когда разность давлений превышает поверхностные силы. Согласно этому предположению, рост пузыря на начальной стадии обусловлен превышением давления в нем над давлением в жидкости [182].

$$R_* = 2\sigma / (P_v - P_l), \quad (3.2.2.9)$$

где R_* - критический зародыш парообразования, м; σ – поверхностное натяжение, Н/м; P_v – давление пара в пузырьке, Па; P_l – давление в жидкости, Па.

Следует отметить, что данное выражение (3.2.2.9) можно использовать лишь при перегревах жидкости на готовых центрах, которые существенно ниже предельных (при безактивационном вскипании), когда понятие критического зародыша для описания роста пузыря обосновано наличием в жидкости парогазовых пузырьков или твердых примесей [182]. При предельных значениях перегрева жидкости (спонтанном активационном вскипании) использование выражения (3.2.2.9) не имеет ясного физического обоснования, как при безактивационном вскипании. В таком случае определяющую роль при росте парового пузыря играет импульс отдачи пара [182]. В рамках диссертационной работы рассмотрен только случай безактивационного вскипания на готовых центрах парообразования, так как при проведении опытов используемые жидкости не подвергались специальной обработке и поэтому содержали в своем составе примеси как в виде газовых пузырьков, так и виде твердых примесей. Кроме того, именно такие условия чаще всего наблюдаются в реальных газопарокапельных технологиях [87,90].

Давление водяных паров внутри исследуемой капли (рис. 3.2.2.2) [163] определялось в соответствии с выражением (3.2.2.10):

$$P_{\text{sat}} = P_{\text{amb}} \cdot \exp \left[\frac{L_w M_w}{R_{\text{gas}}} \left(\frac{1}{T_{\text{sat}}} - \frac{1}{T_w} \right) \right], \quad (3.2.2.10)$$

где P_{sat} – давление паров воды, Па; P_{amb} – давление окружающей среды, Па; L_w – теплота парообразования воды, Дж/кг; M_w – молярная масса воды, кг/моль; R_{gas} – универсальная газовая постоянная, $\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{Моль}^{-1}$; T_{sat} – температура кипения воды, К; T_w – температура на границе раздела «вода/топливо», К.

3.2.3 Модель тепломассопереноса до условий микро-взрывного распада по превышению давления в паровой пленке

Схема области решения задачи тепломассопереноса до условий микро-взрывного распада по превышению давления в паровой пленке представлена на рис. 3.2.3.1.

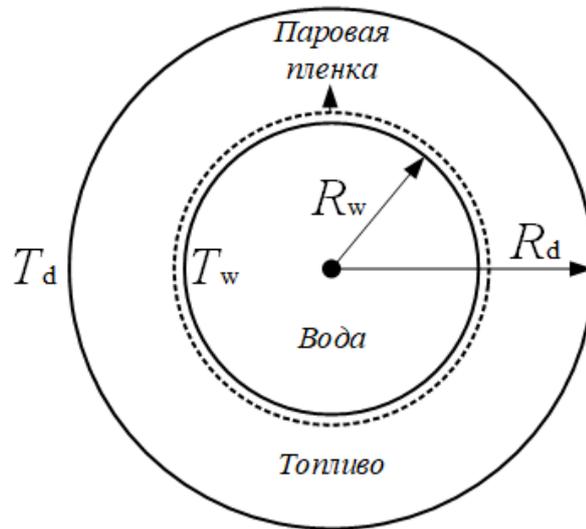


Рисунок 3.2.3.1 – Схема области решения задачи тепломассопереноса до условий микро-взрывного распада по превышению давления в паровой пленке.

Условия тепломассопереноса в исследуемой капле («вода/топливо») описывались аналогично постановке, представленной в разделе 3.2.1. Основным отличием являлся учет баланса сил, действующих на каплю в процессе нагрева со стороны силы поверхностного натяжения, силы давления паров воды и силы давления со стороны атмосферы. Критерием микро-взрывного распада являлось достижение условия превышения силы давления в паровой пленке по сравнению с силами поверхностного натяжения и давления атмосферы (выражение 3.2.3.1).

$$F_{\text{sat}} \geq F_{\text{sigma}} + F_{\text{amb}}, \quad (3.2.3.1)$$

где F_{sat} – сила со стороны давления паров в пленке, Н; F_{sigma} – сила со стороны поверхностного натяжения, Н; F_{amb} – сила со стороны атмосферного давления, Н.

F_{amb} , F_{sat} , F_{sigma} определялись по формулам (3.2.3.2-3.2.3.4):

$$F_{\text{amb}} = P_{\text{amb}} \cdot \pi \cdot R_d^2, P_{\text{amb}} = 101325 \text{ Па}, \quad (3.2.3.2)$$

$$F_{\text{sat}} = P_{\text{sat}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_w^2, P_{\text{sat}} = P_{\text{amb}} \cdot \exp \left[\frac{L_w M_w}{R_{\text{gas}}} \left(\frac{1}{T_{\text{sat}}} - \frac{1}{T_w} \right) \right], \quad (3.2.3.3)$$

$$F_{\text{sigma}} = \sigma_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_d, \quad (3.2.3.4)$$

где σ_1 – поверхностное натяжение в виде зависимости от температуры поверхности капли T_s , Н/м.

3.3 Апробация и достоверность, верификация разработанных моделей

Тестовые результаты расчетов с использованием разработанных математических моделей по перегреву воды на границе раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения и по достижению критического размера (радиуса) пузыря верифицированы при сравнении с экспериментальными данными, полученными при тех же исходных параметрах (начальные размеры капель, температура греющей среды, концентрации жидкостей и др.).

На рис. 3.3.1 показаны зависимости времени задержки микро-взрывного распада, полученные по результатам теоретических исследований с использованием математической модели 1 (по перегреву воды на границе раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения) и экспериментальных данных. Экспериментальные данные, показанные на рис. 3.3.1, соответствуют схеме нагрева при свободном движении двухжидкостной капли в потоке разогретых газов (рис. 2.2.4). Теоретические расчеты проведены при $T_a=1223$ К и 10% дистиллированной воды для двух топливных композиций: вода/дизельное топливо и вода/рапсовое масло.

Хорошо видно (рис. 3.3.1) удовлетворительное согласие экспериментальных и теоретических данных для капель размерами (радиусами) менее 0.7 мм. Максимальные отклонения не превышают 15%. С увеличением начальных размеров (радиусов) капель разница между временами задержки микро-взрывного распада в эксперименте и модели увеличивается. Это связано с основным ограничением модели, которое заключается в центральном расположении водяного ядра относительно оболочки топлива. Поэтому модель позволяет прогнозировать только максимальные значения времени задержки микро-взрывного распада, которые наблюдаются в эксперименте. Кроме того, также следует отметить недостатки экспериментального стенда (рис. 2.2.4), связанные с ограниченным временем нахождения двухжидкостных капель в разогретой газовой среде, которое составляет 0.3-0.5 с. С увеличением начальных размеров

(радиусов) капле снижалась вероятность фрагментации двухжидкостных капель от 100 % до 50-60 %, что обусловлено недостаточностью времени нагрева для достижения условий микро-взрывной фрагментации. В эксперименте регистрировались предельные значения времени задержки микро-взрывного распада для случаев, когда водяное ядро значительно смещается относительно оболочки топлива.

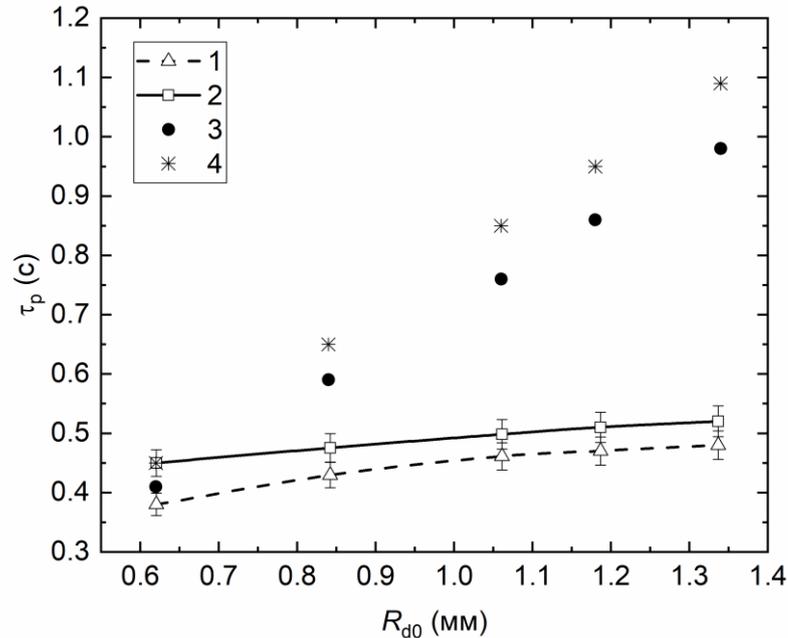


Рисунок 3.3.1 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада от начальных размеров (радиусов) двухжидкостных капель ($T_a=1223$ К, 10 % дистиллированной воды): 1 – вода/дизельное топливо, экспериментальные данные; 2 – вода/рапсовое масло, экспериментальные данные; 3 – вода/дизельное топливо, результаты математического моделирования (модель 1); 4 – вода/рапсовое масло, результаты математического моделирования (модель 1).

На рис. 3.3.2 показаны зависимости времени задержки микро-взрывного распада от температуры греющей среды (a) и начальных размеров (радиусов) двухжидкостных капель (b), полученные по результатам теоретических исследований с использованием математической модели 1 (по перегреву воды на границе раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения) и экспериментальных данных. Экспериментальные данные, показанные на рис.

3.3.2, соответствуют схеме нагрева в муфельной печи (рис. 2.2.2). На стенде (рис. 2.2.2), когда двухжидкостная капля вводится в зону нагрева с использованием металлического держателя, в отличие от стенда (рис. 2.2.4), когда двухжидкостная капля находится в свободном движении, исключалось ограничение по времени нахождения двухжидкостных капель в разогретой газовой среде. Это позволило получить удовлетворительное согласие между экспериментальными и теоретическими данными в широком диапазоне исследуемых температур греющей 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 %.

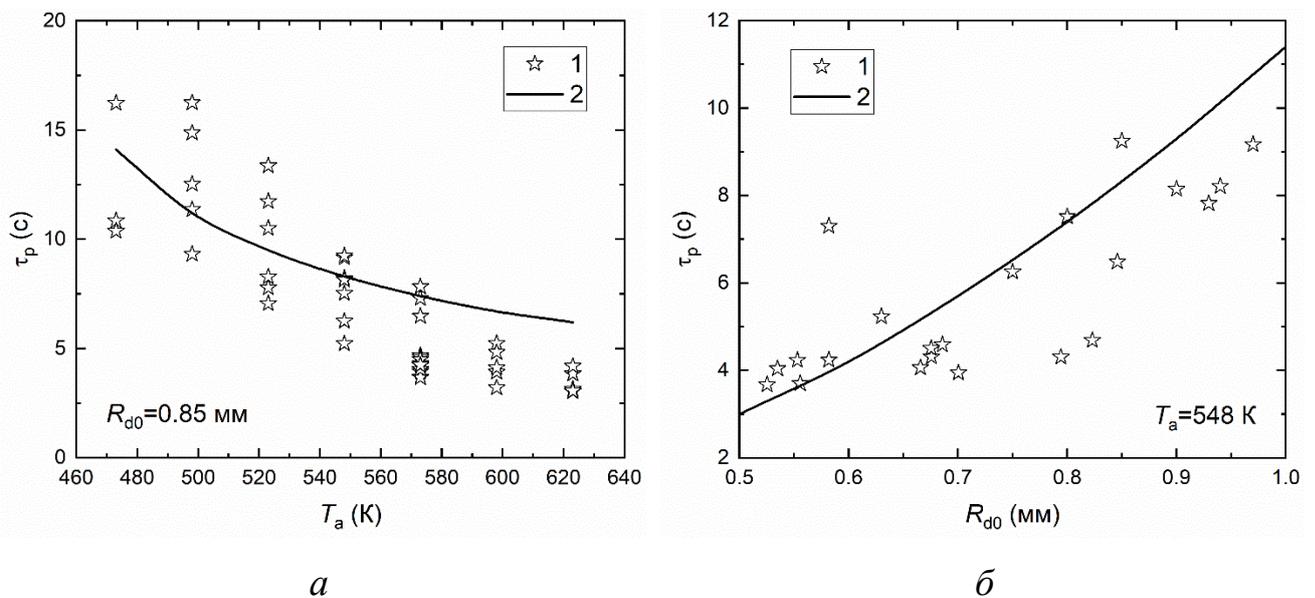


Рисунок 3.3.2 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада от температуры греющей среды (*а*) и начальных размеров (радиусов) (*б*) капель вода/керосин (10 % дистиллированной воды): 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты математического моделирования.

На рис. 3.3.3 представлены зависимости интервала времени между полным распадом и его задержкой, полученные по результатам теоретических исследований с использованием математической модели 2 (по критерию достижения критического размера (радиуса) пузыря) и экспериментальных данных. Экспериментальные данные, показанные на рис. 3.3.3, соответствуют

схеме нагрева в потоке разогретых газов (рис. 2.2.1). Математическая модель 2 позволяет оценить разницу во времени между полным распадом двухжидкостной капли и его задержкой. Хорошо видно (рис. 3.3.3) удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных результатов. Максимальное отклонение не превышает 10 %. Следует отметить, что во всем диапазоне температур от 500 К до 1000 К результаты теоретических расчётов расположены выше экспериментальных, что главным образом связано с тем, что в качестве критерия полного распада выбрано максимально наблюдаемое в экспериментах увеличение в размере пузыря ($K=R_{\text{bubble}}/R_{d0}=3$). А в экспериментах значение K может изменяться в широких диапазонах от 2 до 3 перед микро-взрывным распадом.

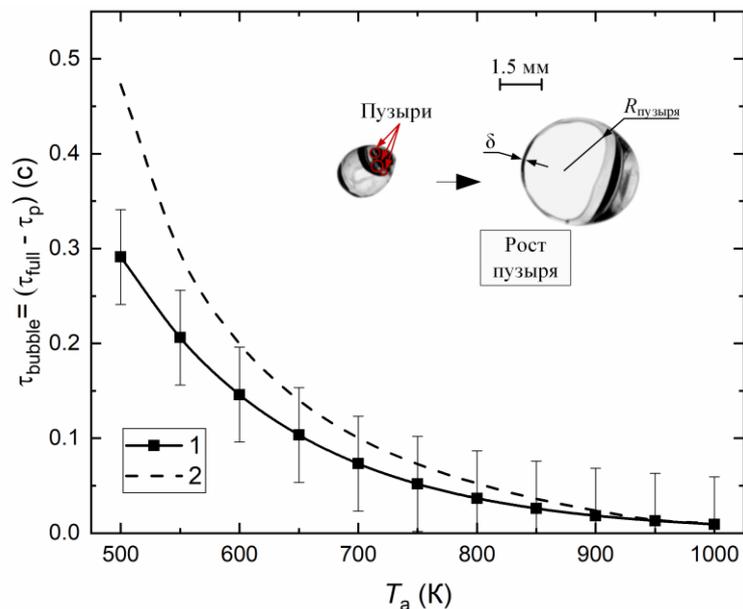


Рисунок 3.3.3 – Зависимости интервала времени между полным распадом и его задержкой от температуры греющей среды (10 % дистиллированной воды, $R_{d0}=0.85$ мм): 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты математического моделирования.

По приведенным на рисунках 3.3.2 и 3.3.3 результатам можно сделать вывод о том, что оба критерия (необходимых условия) микро-взрывного распада капель (превышение температуры начала взрывного кипения воды на границе раздела «вода/топливо»; достижение критического соотношения размеров капли после и

до нагрева за счет роста пузыря) правомерно использовать при математическом моделировании. В экспериментах регистрировались условия, при которых выполнялись оба критерия. При моделировании же достаточно использовать один из двух критериев. Это влияло на значения времен прогрева до условий микро-взрывного распада капель, но не могло оказывать влияние на достоверность определения режима микро-взрывного распада капель.

3.4 Результаты математического моделирования и их обсуждение

Ниже в подразделах 3.4.1-3.4.7 представлены основные результаты теоретических исследований предельных условий микро-взрывной фрагментации капель. Подраздел 3.4.1 посвящен влиянию температуры и теплового потока, подраздел 3.4.2 – влиянию концентрации жидкостей, подраздел 3.4.3 – влиянию начальных размеров капель, подраздел 3.4.4 – влиянию давления окружающей среды, подраздел 3.4.5 – учету кондуктивного, радиационного и конвективного теплового потока, подраздел 3.4.6 – влиянию коллективных эффектов на микро-взрывной распад капель, подраздел 3.4.7 – критериям микро-взрывного распада.

3.4.1 Влияние температуры внешней среды

В результатах экспериментов, представленных в главе 2, показано, что температура греющей среды (соответственно, тепловой поток) является одним из ключевых параметров, влияющих на процессы микро-взрывной фрагментации капель любого состава. Поэтому важным является изучить особенности влияние температуры греющей среды (теплового потока) с точки зрения теории.

На рис. 3.4.1.1 представлены результаты вычисления времени задержки микро-взрывного распада с использованием математической модели 1, описанной в разделе 3.2.1, для двух типичных топливных композиций (вода/дизельное топливо, вода/рапсовое масло). Модель 1 позволяет рассчитывать значения времени задержки микро-взрывного распада, которые являются очень важными с

точки зрения практических приложений, опираясь на экспериментально подтвержденный критерий, связанный с перегревом воды на границе раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения. Следует отметить, что при выполнении численного моделирования учитывались известные справочные [133] зависимости теплофизических свойств жидкостей от температуры. В [45] обосновано, что важно учитывать зависимости основных теплофизических и реологических свойств от температуры как при анализе экспериментальных данных, так и при численном моделировании.

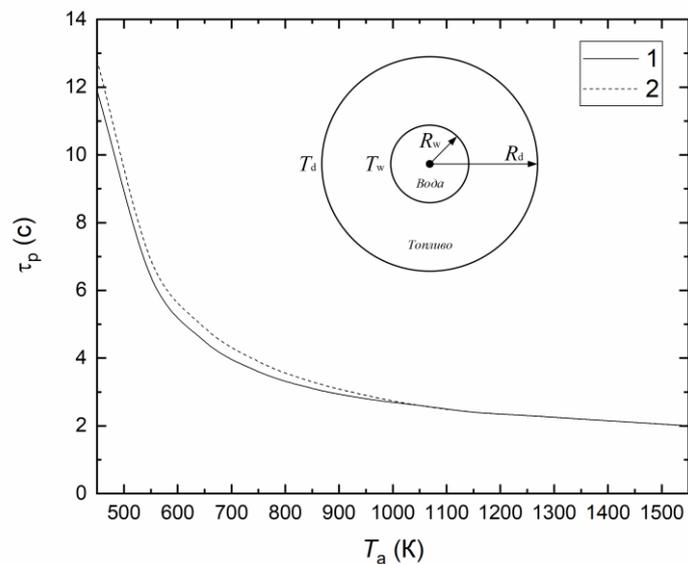


Рисунок 3.4.1.1 – Результаты математического моделирования времени задержки распада с использованием математической модели 1 ($R_{d0} = 0.85$ мм, 10 % дистиллированной воды): 1 – вода/дизельное топливо; 2 – вода/рапсовое масло.

Хорошо видно (рис. 3.4.1.1), как и в случае экспериментальных результатов, что рост температуры греющей среды приводит к снижению времени задержки микро-взрывного распада одиночных двухжидкостных капель, поскольку с увеличением температуры увеличивается количество теплоты, подводимой к поверхности двухжидкостной капли в единицу времени. Следует отметить, что максимальные значения τ_p в диапазоне температур греющей среды от 450 до 1550 К соответствуют топливным композициям (вода/рапсовое). Это связано с тем, что рапсовое масло в своем составе имеет более трудно испаряемые компоненты

(например, метиловые эфиры), а главный компонент рапсового масла метилолеат ($C_{19}H_{36}O_2$) имеет во много раз меньшие скорости испарения по сравнению с главным компонентом дизельного топлива (н-додеканом) [133]. Нелинейный характер зависимостей (рис. 3.4.1.1) обусловлен экспоненциальными зависимостями скоростей испарения горючих и негорючих жидкостей от температуры [133]. Также видно, что чем выше температура нагрева двухжидкостной капли, тем слабее становилось влияние зависимостей теплофизических и реологических свойств от температуры.

3.4.2 Влияние соотношения концентраций жидкостей

На рис. 3.4.2.1 представлены зависимости времени задержки микро-взрывного распада от концентрации воды η_w с использованием математической модели, описанной в разделе 3.2.1, для двух типичных топливных композиций (вода/дизельное топливо, вода/рапсовое масло).

Хорошо видно (рис. 3.4.2.1), как и в случае экспериментальных результатов, что зависимости времени задержки микро-взрывного распада от концентрации воды существенно нелинейные, что говорит о значительном влиянии концентрации воды на группу взаимосвязанных процессов, способствующих микро-взрывному распаду исходных двухжидкостных капель.

На рис. 3.4.2.1 для составов вода/дизельное топливо, вода/рапсовое масло прослеживается минимум времени прогрева двухжидкостной капли перед микро-взрывным распадом при равных относительных концентрациях горючей и негорючей жидкостей. Это обусловлено группой противоположных по характеру влияния факторов и процессов. За счет большей теплоемкости и теплоты парообразования прогрев воды идет достаточно медленно по сравнению с топливом, но теплопроводность и температуропроводность последнего в несколько раз ниже, чем у воды. Скорее всего, влияние оказывает также тот фактор, что при малой концентрации воды в капле толщина пленки горючей

жидкости большая, и она прогревается медленнее до условий микро-взрывной фрагментации. Как следствие, при идентичных условиях нагрева и равных концентрациях жидкостей доминируют факторы, обусловленные снижением времени задержки микро-взрывного распада. А при максимально и минимально возможных концентрациях воды прослеживается другая тенденция (доминируют факторы, обуславливающие увеличение времени задержки микро-взрывного распада). Так, например, при больших концентрациях воды пленка горючей жидкости мала, но времена задержки микро-взрывного распада увеличиваются по сравнению с концентрацией воды равной 50 %, что главным образом обусловлено увеличением эффективной теплоемкости и теплоты парообразования топливной композиции. Проведенные вычисления (как и результаты экспериментов) показали, что для любого состава исследованных капель имеется некоторая оптимальная относительная объемная концентрация жидкостей, при которой достигаются минимальные времена прогрева до условий микро-взрывного распада.

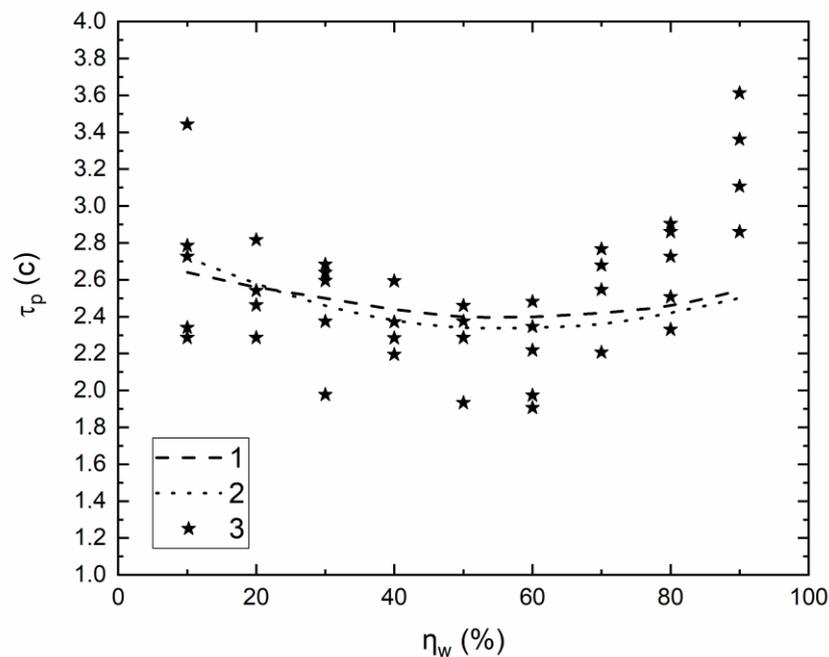


Рисунок 3.4.2.1 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада от концентрации воды η_w с использованием математической модели 1 ($R_{d0} = 0.85$ мм, $T_a = 1000$ К): 1 – вода/дизельное топливо; 2 – вода/рапсовое масло; 3 – экспериментальные данные для капель вода/дизельное топливо.

3.4.3 Влияние начальных размеров капель жидкостей

На рис. 3.4.3.1 представлены зависимости времени задержки микро-взрывного распада от начальных размеров (радиусов) капель R_{d0} с использованием математической модели 1, описанной в разделе 3.2.1, для трех топливных композиций (вода/керосин, вода/дизельное топливо, вода/рапсовое масло). Начальные размеры (радиусы) двухжидкостных капель варьировались в диапазоне от 0.01 мм до 1 мм.

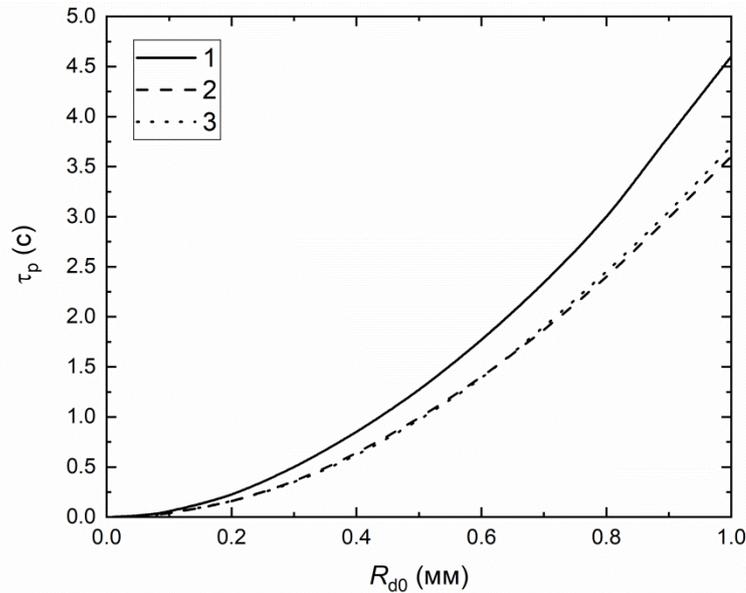


Рисунок 3.4.3.1 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада от начальных размеров (радиусов) капель R_{d0} с использованием математической модели 1 ($T_a = 1000$ К, 10 % дистиллированной воды): 1 – вода/керосин; 2 – вода/дизельное топливо; 3 – вода/рапсовое масло.

Хорошо видно, что чем выше начальные размеры (радиусы) капель, тем больше значения времени задержки микро-взрывной фрагментации. При увеличении начальных размеров (радиусов) капель от 0.5 мм до 1 мм времена задержки фрагментации увеличиваются в 3.62 раза для капель вода/керосин, в 3.64 раза для капель вода/дизельное топливо и в 3.81 раза для капель вода/рапсовое масло. Нелинейные зависимости (рис. 3.4.3.1) времени задержки микро-взрывной фрагментации от начальных размеров (радиусов) капель

обусловлены с одной стороны квадратичным увеличением площади поверхности испарения при повышении размеров капель, экспоненциальной зависимостью скоростей испарения от температуры, а с другой – степенной зависимостью скоростей испарения горючих жидкостей от концентрации газов. Поэтому зависимости $\tau_p(R_{d0})$ на некоторых участках также соответствуют квадратичным и степенным функциям.

Также из анализа рис. 3.4.3.1 можно сделать вывод о том, что значения времени задержки распада капель при размерах последних менее 0.2 мм меняются незначительно. Так как типичные диапазоны размеров капель в формируемых современными распылительными системами топливных факелах составляют от 10 мкм до 300 мкм, то можно сделать вывод о довольно близких значениях фрагментации капель во всем типичном диапазоне их размеров. При одновременной фрагментации группы капель в топливном факеле будут проявляться синергетические эффекты, состоящие в ускорении зажигания соседних частиц, повышении скоростей распространения фронта пламени и полноты выгорания топлива. Установленные зависимости (рис. 3.4.3.1) показывают, что в широком диапазоне размеров можно обеспечить интенсивную фрагментацию полидисперсного капельного аэрозоля в течение довольно малого времени пребывания в камерах сгорания. Таким образом можно решить наиболее существенную проблему зажигания капель, которая состоит в высокой инерционности зажигания композиционных топлив в камерах сгорания дизельных двигателей и топочных пространствах котельных агрегатов вследствие большой концентрации воды, высокой теплоемкости последней и теплоты парообразования. Проведенное математическое моделирование позволило установить целесообразные диапазоны начальных размеров капель для интенсивной фрагментации в условиях ограниченного движения в типичных камерах сгорания дизельных двигателей и котельных агрегатов. С использованием данных 3.4.3.1 можно получить аппроксимационные выражения для $\tau_p(R_{d0})$ и использовать их при управлении процессами фрагментации капель в

дизельных двигателях и топках котлов при применении различных форсуночных устройств, размеров капель и температурных режимов камер сгорания.

3.4.4 Влияние давления внешней газовой среды

На рис. 3.4.4.1 представлены зависимости времени задержки микро-взрывного распада от давления окружающей среды P_{amb} с использованием математической модели 1, описанной в разделе 3.2.1, для трех типичных топливных композиций (вода/керосин, вода/дизельное топливо, вода/рапсовое масло). Давление окружающей среды варьировалось в диапазоне от 1 до 50 бар, что является типичным для различных высокотемпературных газопарокапельных технологий (дизельные двигатели, котельные агрегаты, системы термической очистки воды, пожаротушение и т.д.)

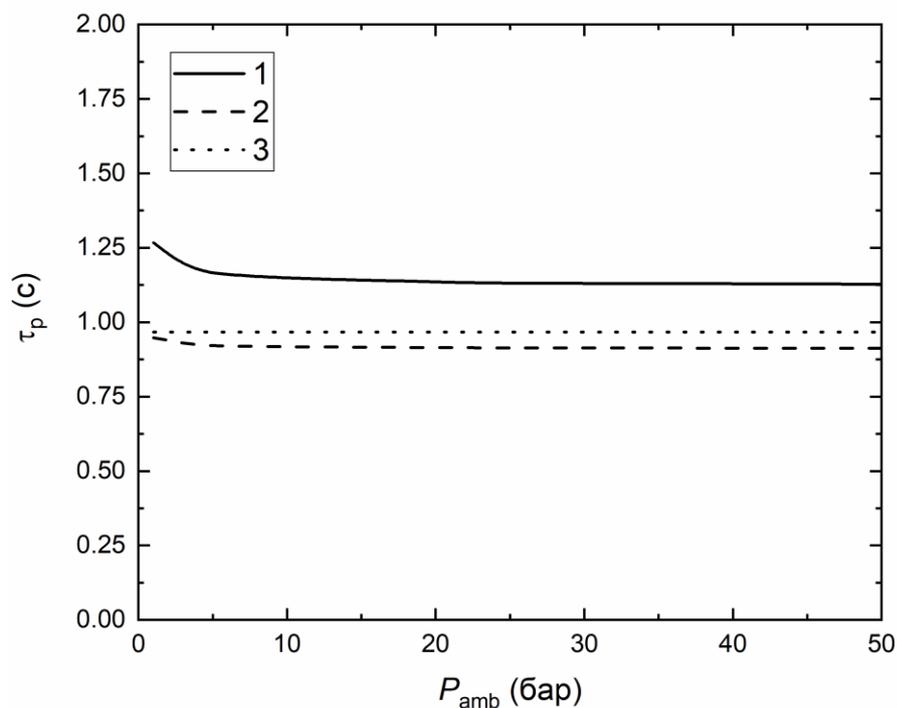


Рисунок 3.4.4.1 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада от давления окружающей среды P_{amb} с использованием математической модели 1 ($R_{d0} = 0.5$ мм, $T_a = 1000$ К, 10 % дистиллированной воды): 1 – вода/керосин; 2 – вода/дизельное топливо; 3 – вода/рапсовое масло.

На рис. 3.4.4.1 видно, что с увеличением давления окружающей среды времена задержки фрагментации снижаются незначительно. Так, например, снижение времени задержки микро-взрывного распада с увеличением давления окружающей среды в диапазоне от 1 до 50 бар составляет менее 10 % для капель вода/керосин, менее 4 % для капель вода/дизельное топливо и менее 0.1 % для капель вода/рапсовое масло. Такое слабое влияние давления окружающей среды на времена задержки микро-взрывного распада обусловлено достаточно быстрым достижением условий распада за время менее 1.25 с. За такое короткое время нагрева до условий распада двухжидкостные капли не успевают значительно испариться. Концентрация паров топлива вблизи границы капля/окружающая среда не высокая (не превышает 60 % для капель вода/керосин) перед микро-взрывным распадом. Как следствие, давление окружающей среды слабо влияет на времена задержек распада за достаточно короткие времена нагрева.

Также на рис. 3.4.4.1 показано, что чем выше скорости испарения горючих жидкостей, тем больше влияние давления на характеристики микро-взрывной фрагментации. Так, например, для капель вода/керосин установлено более явное влияние давления по сравнению с каплями вода/рапсовое масло. Скорости испарения керосина почти в 9 раз больше, чем у рапсового масла [133].

3.4.5 Кондуктивный, конвективный и радиационный нагрев

Важной задачей при математическом моделировании являлся переход на существенно большие диапазоны варьирования параметров по сравнению с экспериментами с целью приближения условий протекания процессов к действующим дизельным двигателям и топочным камерам сгорания, где одновременно присутствуют все три вида тепловых потоков (кондуктивный, конвективный и радиационный).

На рис. 3.4.5.1 представлены зависимости времени задержки микро-взрывного распада от температуры греющей среды (a) и начальных размеров

(радиусов) капле́ль вода/дизельное топливо (*б*) при разных условиях подвода тепла с использованием математической модели, описанной в разделе 3.2.1. Проведены расчеты с учетом кондуктивного нагрева двухжидкостной капли, с учетом кондуктивного и радиационного нагрева, а также с учетом кондуктивного, радиационного и конвективного нагрева в диапазоне температур от 450 К до 1550 К и начальных размеров (радиусов) капле́ль от 0.01 мм до 1 мм.

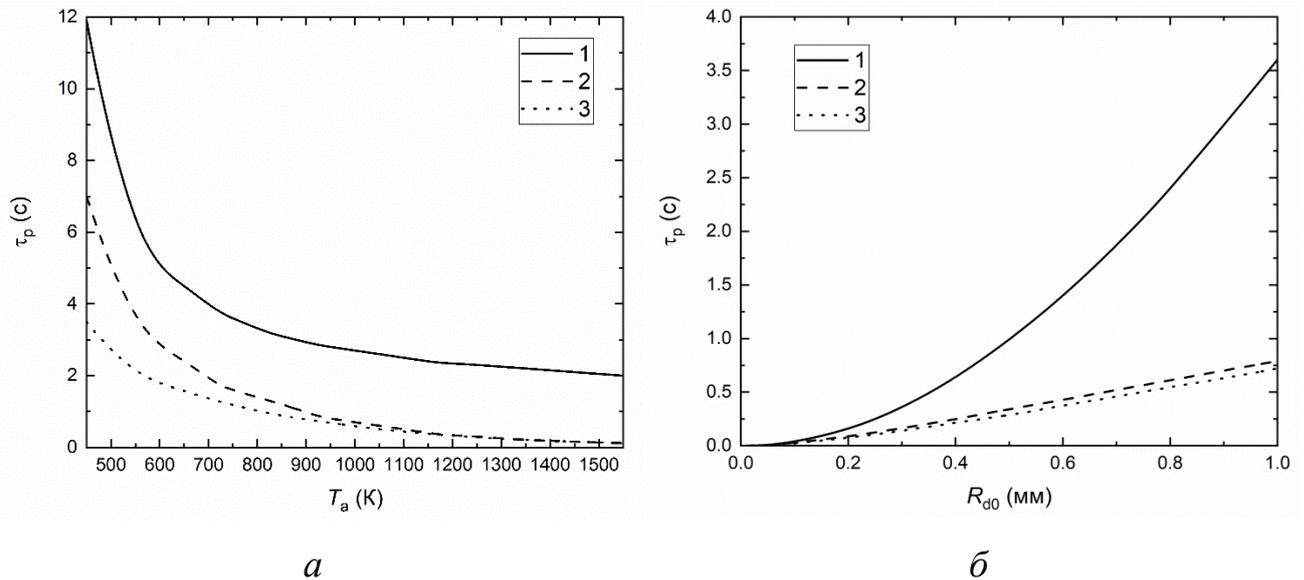


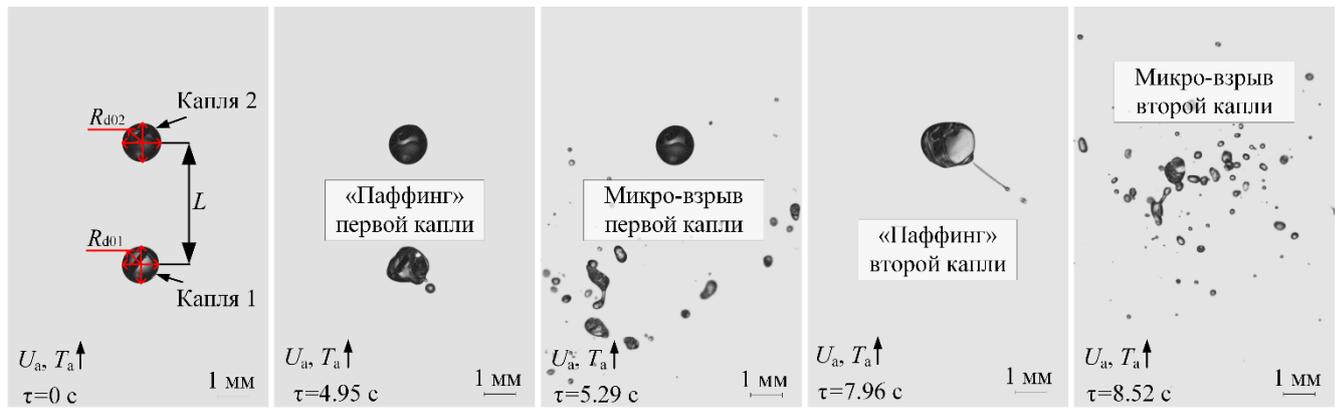
Рисунок 3.4.5.1 – Зависимости времени задержки микро-взрывного распада от температуры греющей среды (*а*) и начальных размеров (радиусов) капле́ль вода/дизельное топливо (*б*) при разных условиях подвода тепла с использованием математической модели 1 (10 % дистиллированной воды): 1 – кондуктивный нагрев; 2 – кондуктивный и радиационный нагрев; 3 – кондуктивный, радиационный и конвективный нагрев ($U_a=3$ м/с).

В большинстве энергетических приложений типичные температуры в камерах сгорания составляют 1000-1500 К. Максимальные температуры в камерах сгорания могут достигать 2200 К. Результаты выполненных теоретических исследований показали, что при таких температурах в камерах сгорания важно учитывать все три вида тепловых потока (кондуктивный, радиационный и конвективный) при прогнозировании характеристик фрагментации капле́ль в режимах «паффинг» и микро-взрыв.

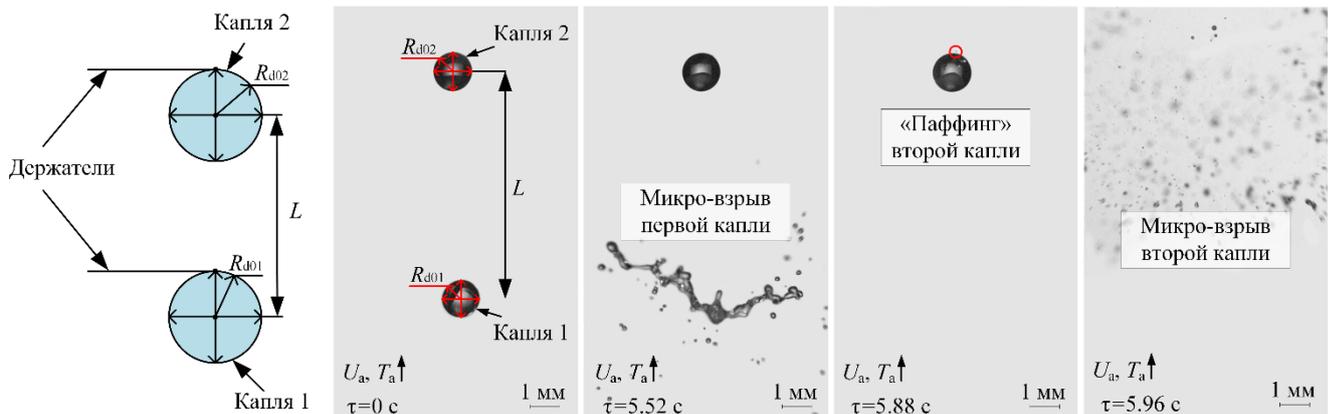
3.4.6 Влияние коллективных эффектов в совокупности капель

Взаимное расположение капель в спреях и аэрозолях оказывает существенное влияние не только на характеристики прогрева и испарения, но и на характеристики фрагментации, а также последующего зажигания капель [63]. Для изучения влияния коллективных эффектов на процессы фрагментации двухжидкостных капель разработана математическая модель, позволяющая учитывать совместное влияние соседних капель при определении времени задержки микро-взрывного распада в широких диапазонах варьируемых параметров: температуры греющей среды, концентрации жидкостей, начальных размеров капель и т.д.

На рис. 3.4.6.1 приведены типичные видеокадры процессов фрагментации группы двухжидкостных капель в эксперименте при варьировании расстояния между ними. При проведении исследований установлено, что расположенная первой в разогретом потоке (по направлению его движения) капля может оказывать различное влияние на прогрев, испарение и микро-взрывную фрагментацию второй капли. При этом типичными режимами существования второй капли при «паффинг» и микро-взрывном распаде первой являются монотонное испарение, «паффинг» или микро-взрывной распад. Анализ видеокадров показал, что если первая капля фрагментирует в режиме микро-взрывного распада, то при варьировании расстояния до второй капли можно обеспечить реализацию «паффинг» или микро-взрывной распад. Если понизить температуру газовой среды до условий, при которых первая капля фрагментирует в режиме «паффинг» или реализуется ее монотонное испарение, то в зависимости от расстояния до второй капли реализуется ее «паффинг» или монотонное испарение. Если же первая капля испаряется без дробления, то и вторая капля не фрагментирует. Таким образом, за счёт варьирования температуры и расстояния между каплями можно обеспечить реализацию разных режимов фрагментации.



а



б

Рисунок 3.4.6.1 – Видеокадры «паффинг»/микро-взрыв: *а* – есть влияние соседних капель (вода/рапсовое масло, 10 % дистиллированной воды, $T_a \approx 485$ К, $U_a = 0.5 \pm 0.1$ м/с, $C = L/(2 \cdot R_{d0}) \approx 3.25$), *б* – нет влияния соседних капель (вода/рапсовое масло, 10 % дистиллированной воды, $T_a \approx 497$ К, $U_a = 0.5 \pm 0.1$ м/с, $C = L/(2 \cdot R_{d0}) \approx 7.5$).

При сравнительном анализе видеокадров опытов, выполненных с двухжидкостными каплями и эмульсиями в диапазоне температур 550 К до 650 К, установлено, что наиболее типичным режимом фрагментации для эмульсии является «паффинг», а для двухжидкостных капель – микро-взрывная фрагментация. При более высоких температурах (в частности, выше 700 К) и для эмульсий характерен режим микро-взрывного распада (как показали эксперименты [76]). Основная причина различия режимов фрагментации исследуемых капель состоит в том, что дисперсная фаза-вода распределена в объеме двух исследуемых типов капель по-разному. В капле эмульсии

микрообъемы воды равномерно распределены, что существенно увеличивает теплоёмкость и теплоту парообразования всей капли. Как следствие, для достижения условий микро-взрыва (например, перегрева границы раздела «вода/топливо» до температуры взрывного кипения воды) требуется больше времени и энергии. Так как вода распределена по всему объёму эмульсии, то в приповерхностном слое локально микро-капельки воды перегреваются до температуры взрывного кипения и это приводит к локальным случаям «паффинг». В двухжидкостных каплях имеется строгая граница раздела сред («вода/топливо»). При этом топливо представляет оболочку, а вода – ядро двухжидкостной капли. Скорость прогрева и испарения топлива в несколько раз выше чем у воды. Поэтому в течение короткого интервала времени граница раздела «вода/топливо» перегревается и происходит распад капли.

Эффекты взаимодействия двух капель друг на друга в тандеме при моделировании учитывались через модификации чисел Нуссельта и Шервуда для этих капель по результатам численных расчетов. Для достаточно больших расстояний между каплями в тандеме, значения чисел Нуссельта и Шервуда практически идентичны, как и для одиночных капель. Однако, когда расстояние между каплями становится сопоставимым с их начальными размерами, температурные и аэродинамические следы впереди идущих капель существенно влияют на характеристики теплообмена позади идущих капель [24]. Таким образом, для обеспечения достоверных прогнозируемых расчётов безразмерные числа Нуссельта и Шервуда необходимо модифицировать с учетом влияния соседних капель [183].

Для получения модифицированных значений чисел Нуссельта и Шервуда использована модель [24]. В отличие от [24], предполагается, что две капли имеют одинаковый размер, температуру и концентрацию пара на поверхности. Основные допущения при получении модифицированных значений чисел Нуссельта и Шервуда заключались в следующем:

1. Процессы в газовой фазе стационарны. Это оправдано тем, что в газовой фазе наблюдаются более высокие скорости диффузии тепла и массы по сравнению со скоростями диффузии в капле.

2. Поток Стефана игнорируется при численных расчетах. Для капель вода/рапсовое масло (10 % воды) поток Стефана пренебрежимо мал. Значения чисел Сполдинга B_M и B_T не превышают 10^{-3} согласно экспериментальным данным при температурах T_a близких к 430 К (рис. 3.4.6.1).

3. Предполагается, что капли представляют собой полые сферы. Скорости конвективных течений в капле малы по сравнению со скоростями набегающего потока, поскольку динамическая вязкость газа на три порядка ниже, чем жидкости.

4. Температура и концентрация пара вблизи поверхности капли считаются однородными. Это упрощение приемлемо с учетом того, что при прогнозировании времен задержек микро-взрывного распада используются усредненные значения чисел Нуссельта и Шервуда.

5. Предполагается, что свойства газовой фазы однородны, т.е. не зависят от концентрации паров и температуры.

Система стационарных дифференциальных уравнений (3.4.6.1)-(3.4.6.4) в сферической системе координат для получения корреляций чисел Нуссельта и Шервуда в тандеме из двух капель представлено ниже с учетом упомянутых выше предположений и упрощений.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.4.6.1)$$

$$\rho_a (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot \left[-pI + \mu_a \left(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \right) \right] \quad (3.4.6.2)$$

$$\nabla (-D_v \nabla c) + \vec{v} \cdot \nabla c = 0 \quad (3.4.6.3)$$

$$\nabla (k_a \nabla T) + \rho_a C_{pa} \vec{v} \cdot \nabla T = 0 \quad (3.4.6.4)$$

где c – концентрация паров; T – температура, К; v – скорость потока газов.

Схема области решения задачи тепломассопереноса в тандеме из двух капель представлена на рис 3.4.6.2.

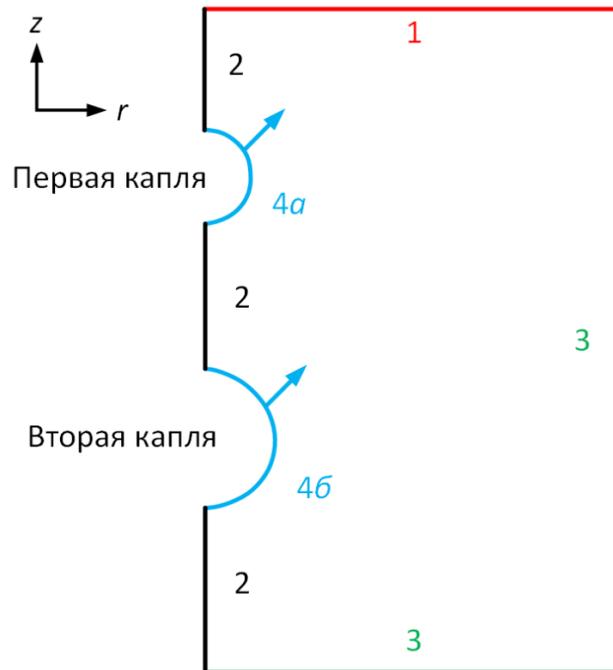


Рисунок 3.4.6.2 – Схема области решения задачи тепломассопереноса в тандеме из двух капель.

Граничные условия для решения задачи по определению корреляций чисел Нуссельта и Шервуда в тандеме из двух капель представлены в (3.4.6.5) - (3.4.6.11).

Граница 1, поток газа:

$$v_r = 0 \quad (3.4.6.5)$$

$$Z = Z_\infty, Z = v_z, c \text{ или } T \quad (3.4.6.6)$$

где v_∞ - скорость потока газов, м/с, c_∞ - концентрация паров топлива в газовой фазе, T_∞ - температура воздуха, К. Граница 1 расположена перед первой каплей на расстоянии примерно в 8 раз больше ее диаметра.

Граница 2, осесимметричная граница, $r=0$:

$$\frac{\partial Z}{\partial r} = 0, Z = v_r, v_z, c \text{ или } T \quad (3.4.6.7)$$

Граница 3, открытая граница:

$$\begin{cases} -\vec{n} D_{\nu} \vec{\nabla} Z = 0 \text{ если } \vec{n} \cdot \vec{\nu} \geq 0, \\ Z = Z_{\infty} \text{ если } \vec{n} \cdot \vec{\nu} < 0. \end{cases} \quad (3.4.6.8)$$

$$\vec{n} \cdot \left[-pI + \mu_a \left(\nabla \vec{\nu} + (\nabla \vec{\nu})^T \right) \right] = \vec{0} \quad (3.4.6.9)$$

где $Z=c, T$.

Граница 4, поверхность капли:

$$\vec{u} = 0 \quad (3.4.6.10)$$

$$Z = Z_{S,k}, Z = c, T \quad (3.4.6.11)$$

где k – номер капли.

Система стационарных дифференциальных уравнений (3.4.6.1)-(3.4.6.4) с граничными условиями (3.4.6.5)-(3.4.6.11) решалась с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Comsol Multiphysics. Схема области решения (рис. 3.4.6.2) разбивалась на конечное число элементов. Использовалась неструктурированная треугольная сетка со сгущением вблизи поверхности капель.

Числа Нуссельта (3.4.6.12) и Шервуда (3.4.6.13) первой и второй капли определялись как:

$$\text{Nu}_k = \frac{2R_{d,k}}{T_{\infty} - T_{S,k}} \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_S \quad (3.4.6.12)$$

$$\text{Sh}_k = \frac{2R_{d,k}}{c_{\infty} - c_{S,k}} \left. \frac{\partial c}{\partial n} \right|_S \quad (3.4.6.13)$$

где $R_{d,k}$ – радиус k -ой капли.

Числа (3.4.6.12) и (3.4.6.13) усреднялись по всей поверхности капли для дальнейшего использования при моделировании нагрева и испарения капли:

$$\langle \text{Nu} \rangle_k = \frac{2}{\pi R_{d,k}^2} \int_{z_k - R_{d,k}}^{z_k + R_{d,k}} \text{Nu}(r, z) \cdot r \cdot dz, \quad (3.4.6.14)$$

$$\langle \text{Sh} \rangle_k = \frac{2}{\pi R_{d,k}^2} \int_{z_k - R_{d,k}}^{z_k + R_{d,k}} \text{Sh}(r, z) \cdot r \cdot dz, \quad (3.4.6.15)$$

где $r = \sqrt{R_{d,k}^2 - z^2}$ и z_k – координаты k -ой капли.

На рис. 3.4.6.3 показаны основные параметры системы, состоящей из двух капель в тандеме, которые важны при рассмотрении различных ситуаций нагрева и испарения капель.

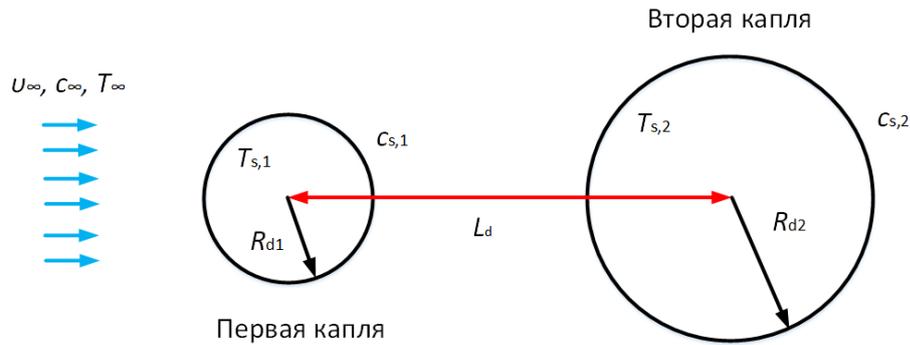


Рисунок 3.4.6.3 – Основные параметры системы, состоящей из двух капель в тандеме.

Для получения модифицированных корреляций чисел Нуссельта и Шервуда для группы из двух капель относительно одиночной капли введены следующие безразмерные числа:

Отношение размеров двух капель (3.4.6.16):

$$r_D = \frac{R_{d01}}{R_{d02}} \quad (3.4.6.16)$$

Параметр C (3.4.6.17):

$$C_d = \frac{L_d}{2R_{d01}} = \frac{L_d}{2r_D R_{d02}} \quad (3.4.6.17)$$

Число Рейнольдса для двух капель (3.4.6.18):

$$\text{Re}_1 = \frac{2\rho_a v_\infty R_{d01}}{\mu_a}, \quad \text{Re}_2 = \frac{2\rho_a v_\infty R_{d02}}{\mu_a} \quad (3.4.6.18)$$

Отношение концентраций паров и температур (3.4.6.19):

$$r_c = \frac{c_{s,1} - c_\infty}{c_{s,2} - c_\infty}, r_T = \frac{T_{s,1} - T_\infty}{T_{s,2} - T_\infty} \quad (3.4.6.19)$$

Численное моделирование проведено для широкого диапазона безразмерных параметров (3.4.6.16)-(3.4.6.19): $2 \leq C_d \leq 10$, $0.5 \leq r_D \leq 1.5$, $3 \leq Re_2 \leq 15$, $1.5 \leq Re_1 \leq 30$, $0.4 \leq r_c \leq 4$, $0.4 \leq r_T \leq 4$.

Итоговые корреляции Nu и Sh для первой капли определялись как:

$$Nu_1 = Nu_0(Re_1, Pr) - A_1 Re_1^{B_1} + G_1 \cdot \left(\frac{1}{r_T} - 1 \right) \quad (3.4.6.20)$$

$$Sh_1 = Sh_0(Re_1, Sc) - A_1 Re_1^{B_1} + G_1 \cdot \left(\frac{1}{r_c} - 1 \right) \quad (3.4.6.21)$$

$$G_1 = \frac{F_{11}}{Re_1^2} + \frac{F_{12}}{Re_1} + F_{13} \quad (3.4.6.22)$$

Итоговые корреляции Nu и Sh для второй капли определялись как:

$$Nu_2 = Nu_0(Re_2, Pr) - A_2 Re_2^{B_2} + G_2 \cdot (r_T - 1) \quad (3.4.6.23)$$

$$Sh_2 = Sh_0(Re_2, Sc) - A_2 Re_2^{B_2} + G_2 \cdot (r_c - 1) \quad (3.4.6.24)$$

$$G_2 = F_{21} Re_2 + F_{22} \quad (3.4.6.25)$$

где Nu_0 и Sh_0 – числа Нуссельта и Шервуда для одиночной капли:

$$Nu_0(Re, Pr) = 1 + (1 + \alpha_0 \cdot Re \cdot Pr)^{\gamma_0} \cdot (1 + \delta_0 Re)^{\beta_0} \quad (3.4.6.26)$$

$$Sh_0(Re, Sc) = 1 + (1 + \alpha_0 \cdot Re \cdot Sc)^{\gamma_0} \cdot (1 + \delta_0 Re)^{\beta_0} \quad (3.4.6.27)$$

где $\alpha_0 = 1.0024$; $\gamma_0 = 0.3419$; $\beta_0 = 0.0989$; $\delta_0 = 0.2046$.

Значения коэффициентов $A_1, B_1, A_2, B_2, F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}$ для корреляций числа Нуссельта представлены в таблице 3.4.6.1, а для числа Шервуда в таблице 3.4.6.2.

Таблица 3.4.6.1 – Значения коэффициентов $A_1, B_1, A_2, B_2, F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}$ для корреляций числа Нуссельта при $t=0$ ($L_d=4.2$ мм, $R_{d10}=R_{d20}$).

Коэффициент	R_{d10} и R_{d20} , мм				
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
A_1	0.0061633	0.0132504	0.019768	0.0421065	0.103088
B_1	0.3159	0.1930415	0.082013	-0.12051125	-0.38129333
A_2	0.223186	0.26439	0.29727	0.3322375	0.36486333
B_2	0.447646	0.43112	0.41819	0.4063675	0.39673
F_{11}	-0.04097457	-0.1195034	-0.25490369	-0.30711675	-0.17107243
F_{12}	0.00973788	0.02369011	0.03333593	-0.03395087	-0.20059051
F_{13}	-0.00052481	-0.00111552	-0.00110968	0.00328812	0.00877699
F_{21}	-0.01721242	-0.01847402	-0.0192301	-0.01972684	-0.01997152
F_{22}	-0,26891507	-0.31333935	-0.36340362	-0.41497406	-0.46892565

Таблица 3.4.6.2 – Значения коэффициентов $A_1, B_1, A_2, B_2, F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}$ для корреляций числа Шервуда при $t=0$ ($L_d=4.2$ мм, $R_{d10}=R_{d20}$).

Коэффициент	R_{d10} и R_{d20} , мм				
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
A_1	0.02866333	0.03575991	0.04183403	0.04982924	0.05898938
B_1	-0.07298861	-0.00071278	0.04957298	0.08342793	0.10149738
A_2	0.36198229	0.41900913	0.46401151	0.51089414	0.55514812
B_2	0.49648445	0.48173511	0.47017657	0.45846503	0.44765678
F_{11}	-0.00000101	-0.00101248	-0.00202366	-0.02904304	-0.09143958
F_{12}	0.00000025	0.00026604	0.00053175	0.00668877	0.00450542
F_{13}	-0.00000001	-0.0000152	-0.0000304	-0.0003541	-0.00002247
F_{21}	-0.03886605	-0.04101715	-0.04253918	-0.04339202	-0.04381113
F_{22}	-0.3830972	-0.44411528	-0.49230792	-0.54585348	-0.59916308

На рис. 3.4.6.4 представлено сравнение экспериментальных и теоретических результатов изучения времени задержки микро-взрывного распада первой и второй капли в тандеме при варьировании начальных размеров (радиусов) капель.

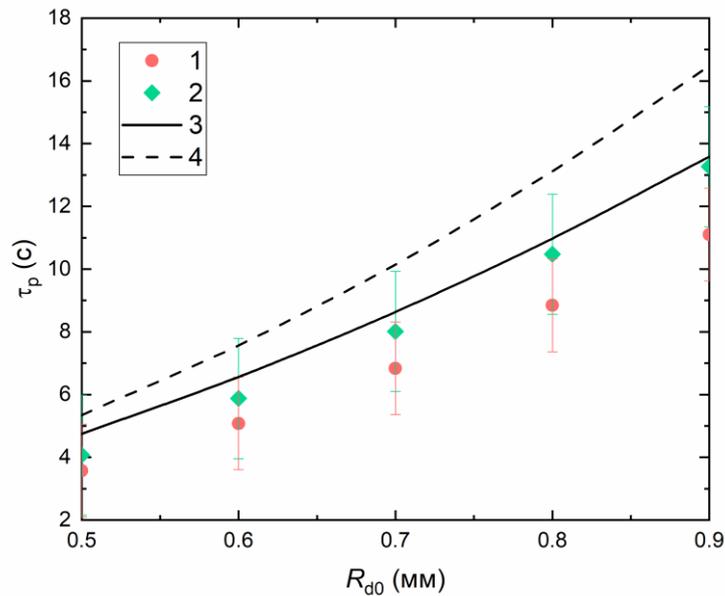


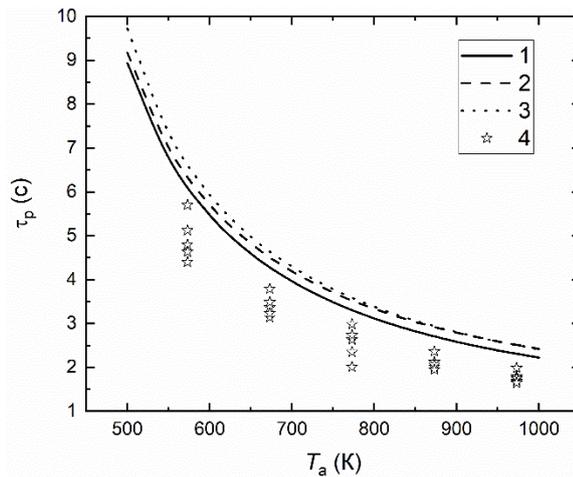
Рисунок 3.4.6.4 – Сравнение экспериментальных и теоретических результатов изучения времени задержки микро-взрывного распада первой и второй капли в тандеме при варьировании начальных размеров капель ($P_{amb}=101325$ Па, $T_a=430$ К, $U_a=0.1$ м/с, $L_d=4.2$ мм, 10 % воды): 1 – 1 капля, экспериментальные данные; 2 – 2 капля, экспериментальные данные; 3 – 1 капля, результаты моделирования; 4 – 2 капля, результаты моделирования.

Хорошо видно (рис. 3.4.6.4), что, как и в случае с одиночными двухжидкостными каплями, экспериментально наблюдаемые и теоретически полученные значения времён задержек микро-взрывного распада увеличиваются с увеличением R_{d0} . Из рисунка 3.4.6.4 также видно, что как экспериментально наблюдаемые, так и предсказанные значения этого времени больше для первой капли по сравнению с таковыми для второй капли. Показано удовлетворительное соотношение теоретических и экспериментальных результатов. Как и в случае с одиночными каплями, прогнозируемые значения времени задержки микро-взрывной фрагментации больше, чем наблюдаемые экспериментально. Это связано с ключевым предположением модели, что водяное ядро расположено строго в центре капли топлива. Смещение водяного ядра относительно оболочки топлива приводит к снижению времени задержки распада в эксперименте.

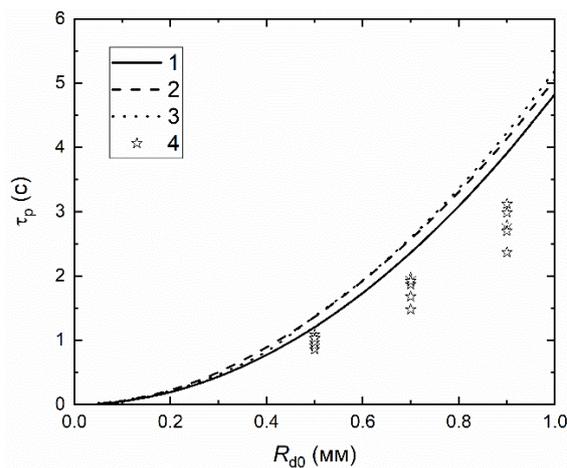
3.4.7 Критерии микро-взрывного распада капель

С использованием трех постановок, отличающихся критериями распада: по перегреву границы раздела «вода/топливо» выше равновесной температуры кипения воды (373.15 К), по перегреву границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения воды, по превышению давления в паровой пленке – установлены времена задержки микро-взрывного распада капель как функции от температуры внешней газовой среды (рис. 3.4.7.1а), начального размера капли (рис. 3.4.7.1б), концентрации жидкостей (рис. 3.4.7.1в). Ключевые входные параметры варьировались в широких диапазонах: $T_a=500-1000$ К, $R_{d0}=0.05-1$ мм, $\eta_w=5-95$ %. Эти диапазоны соответствуют перспективным технологиям вторичного измельчения топлив в энергетических установках и дизельных двигателях.

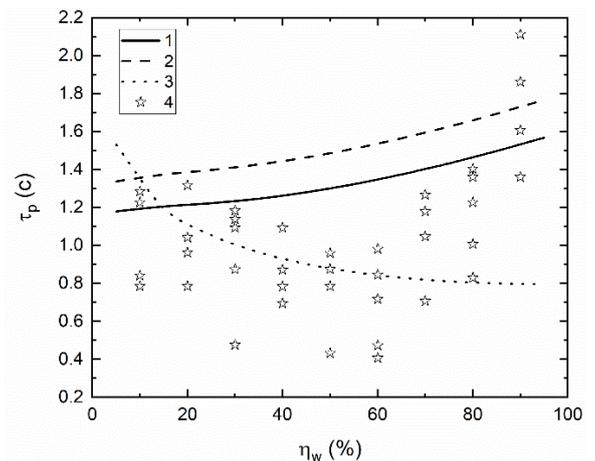
Полученные результаты (рис. 3.4.7.1) показывают, что на отличия τ_d при использовании различных критериев микро-взрывного распада двухжидкостных капель достаточно умеренно влияют: температура газовой среды и начальные размеры (радиусы) капель. Максимальные отличия времени задержки распада по трем критериям не превышают 8 %. Существенное влияние на времена задержки микро-взрывного распада оказывает концентрация дисперсной фазы (воды). Хорошо видно (рис. 3.4.7.1в), что при использовании критериев распада по перегреву воды на границе раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения с увеличением концентрации воды времена задержки распада нелинейно увеличиваются. А по критерию превышения давления в паровой пленке снижаются. Это обусловлено главным образом тем, что в случае первых двух критериев (по перегреву выше равновесной температуры кипения воды (373.15 К) и температуры начала взрывного кипения) определяющее влияние на времена задержки распада оказывает увеличение эффективной теплоемкости топливной композиции (времена задержки снижаются), а в случае третьего критерия – увеличение силы со стороны давления паров воды, обусловленное ростом площади поверхности водяного ядра (времена задержки увеличиваются).



a



б



в

Рисунок 3.4.7.1 – Времена задержки микро-взрывного распада капель вода/дизельное топливо как функции от температуры (а) ($R_{d0}=0.85$ мм, $\eta_w=10$ %), начальных размеров капель (б) ($T_a=750$ К, $\eta_w=10$ %) и концентраций воды ($R_{d0}=0.5$ мм, $T_a=750$ К) (в) с использованием трех критериев фрагментации: 1 – по температуре кипения воды (373.15 К); 2 – по температуре начала взрывного кипения воды; 3 – по превышению давления в паровой пленке; 4 – экспериментальные данные.

Как показали результаты экспериментальных исследований (раздел 2.6.3) зависимости времени задержки распада от концентрации горючей жидкости имеют существенно нелинейный вид, который иллюстрирует сложный механизм разрушения двухжидкостных капель при нагреве. Теоретические расчеты (рис.

3.4.7.1) продемонстрировали существенное влияние выбранного критерия распада на зависимости времени задержки распада от концентрации дисперсной фазы (воды). Для приближения результатов математического моделирования к экспериментальным данным важным является учет всех критериев (по перегреву границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения воды и по превышению давления в паровой пленке) при прогнозировании времен задержек распада. Необходимым и достаточным условием фрагментации капель должно быть достижение одного из критериев распада. Наиболее часто используемый критерий по температуре начала взрывного кипения на границе раздела «вода/топливо» позволяет получать максимальное приближение к экспериментальным данным при учете несимметричности топливной оболочки вокруг водяного ядра.

Также на рис. 3.4.7.1 хорошо видно, что значения τ_p для используемых схем моделирования стабильно выше относительно экспериментальных данных. При этом максимальное значение τ_p для модели с паровой пленкой, далее располагаются значения τ_p , полученные при использовании моделей с достижением равновесной температуры кипения воды (373.15 К) и температуры начала взрывного кипения. Такое расположение кривых и экспериментальных данных на рис. 3.4.7.1 обусловлено принятыми допущениями. В частности, равномерная толщина пленки жидкости вокруг водяного ядра в модели является основной причиной больших значений τ_p относительно экспериментальных данных. Значения τ_p при моделировании можно приблизить к экспериментальным данным за счет снижения толщины пленки топлива вокруг водяного ядра и его смещения относительно центра масс. При этом в реальной практике при движении двухжидкостных капель в газовой среде происходят циклы деформации поверхности, при которых капля принимает форму сферы, эллипсоида, блина [6]. Толщина пленки вокруг ядра непрерывно меняется. Важно при моделировании задавать некоторое среднее значение толщины плёнки топлива с учетом полного цикла деформации.

Выводы по третьей главе

1. Разработаны математические модели тепломассопереноса в капле в условиях, предшествующих микро-взрывному распаду, основанных на использовании следующих критериев: перегрев границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения негорючей жидкости (воды) и достижение предельного радиуса образующихся пузырей в каплях. Выполненное численное моделирование показало, что для прогнозирования времени микро-взрывного распада каплей достаточно применение моделей, в которых используются эти два критерия фрагментации каплей. При помощи данных моделей можно прогнозировать переходные условия (предельные температуры и времена прогрева) между тремя режимами прогрева и испарения двухжидкостных каплей: испарение с сохранением монолитного состояния; частичная фрагментация – «паффинг»; микро-взрывное разрушение. Усложнение прогностических моделей микро-взрывного распада каплей возможно при необходимости детального изучения последствий разрушения, т.е. при расчете числа и размеров вторичных фрагментов.
2. Полученные результаты численных исследований позволяют сделать вывод об их удовлетворительной корреляции с экспериментом. Отклонения средних значений интегральных характеристик не превышают 10–15 %. Они обусловлены допущениями и упрощениями, принимаемыми в моделях, а также неизбежными в случае проведения экспериментов случайными погрешностями. Чем выше температуры нагрева и меньше размеры каплей, тем ближе теоретические и экспериментальные значения характеристик их разрушения. Разработанные модели позволяют с высокой степенью достоверности воспроизводить результаты экспериментов и в широком диапазоне варьировать параметры двухжидкостных каплей (размеры, скорости движения, концентрации горючих и негорючих жидкостей,

материалы и т.д.) и греющей среды (температуру, схему нагрева, скорости движения потока и др.).

3. Сформулированы гипотезы, объясняющие отличия теоретических и экспериментальных значений характеристик микро-взрывного разрушения капель. С использованием полученных результатов исследований обоснованы перспективные направления развития моделей микро-взрывного распада капель жидкостей для последующего их применения при разработке технологий вторичного измельчения жидкостей (например, при иницировании горения топлив, огневой и термической очистке жидкостей от примесей и др.).
4. Полученные результаты теоретических исследований могут быть использованы при оптимизации технологий впрыска перспективных жидких топлив в камеры сгорания двигателей и энергетических установок, т.к. иллюстрируют необходимые и достаточные условия для реализации «паффинг» и микро-взрывной фрагментации, позволяющих в несколько десятков и даже сотен раз увеличить площадь поверхности испарения топлив и, соответственно, тепловыделение в единицу времени, т.е. тепловую мощность.
5. С использованием трех критериев микро-взрывного распада определены теоретические значения времени задержки фрагментации двухжидкостных капель (вода/дизельное топливо) при варьировании ключевых входных параметров в широких диапазонах: $T_a=500-1000$ К, $R_{d0}=0.05-1$ мм, $\eta_w=5-95$ %. Эти диапазоны соответствуют перспективным технологиям вторичного измельчения топлив в энергетических установках и дизельных двигателях.

Заключение

По результатам выполненных диссертационных исследований сформулированы следующие выводы:

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.

Список условных обозначений и символов

$B_M = (Y_{vs} - Y_{v\infty}) / (1 - Y_{vs})$ – массовое число Сполдинга;

B_T – тепловое число Сполдинга;

C – теплоемкость, Дж/(кг·К);

C_d – безразмерный параметр, характеризующий расстояние между двумя каплями;

c – массовая концентрация паров;

D – диаметр, м;

D_0 – начальный диаметр капли, м;

D_v – коэффициент диффузии паров, м²/с;

d_h – внешний диаметр держателя, м;

E – энергия, Дж;

F – объемная доля жидкой фазы;

F_{amb} – сила со стороны атмосферного давления, Н;

F_{sat} – сила со стороны давления паров в пленке, Н;

F_{sigma} – сила со стороны поверхностного натяжения, Н;

f_v – источник силы поверхностного натяжения, Н/м³.

g – ускорение свободного падения, м²/с;

h – высота пламени, см;

K – критерий распада по достижению критического размера (радиуса) пузыря;

k – теплопроводность, Вт/(м·К);

k_{st} – константа сталагмометра;

L – теплота парообразования, Дж/кг;

Le – число Льюиса;

L_d – расстояние между каплями, м;

\dot{m} – скорость массопереноса, кг/(м³·с);

M – молярная масса, кг/моль;

N_{cd} – число вторичных фрагментов;

N_p – число фаз;

Nu – число Нуссельта;

\vec{n} – нормаль к поверхности;

$P(p)$ – давление, Па;

$P(R, t)$ – дополнительный источник тепла;

Pr – число Прандтля;

q – тепловой поток, Вт/м²;

$\left| \dot{q}_d \right|$ – тепло, затрачиваемое на повышение температуры капли, Вт/м²;

$R(r)$ – радиус, м;

R^* – критический зародыш парообразования, м;

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

Re – число Рейнольдса;

r_C – отношение концентрации паров вблизи поверхности двух капель;

r_D – отношение размеров двух капель;

r_T – отношение температур вблизи поверхности двух капель;

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

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

S_c – площадь контакта капли с держателем, м²;

Sc – число Шмидта;

Sh – число Шервуда;

T – температура, К;

T_c – температура в центре капли, К;

\dot{T} – скорость нагрева, К/с;

t – время, с;

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

U – скорость, м/с;

V – объем, м³;

x, y, z – координаты Декартовой системы;

$Y_{vs} (Y_{v\infty})$ – массовая концентрация паров топлива вблизи поверхности капли (в газе);

z, r – координаты сферической системы.

Греческие символы:

α – светимость;

α_c – доверительная вероятность;

$\alpha_0, \gamma_0, \beta_0, \delta_0$ – коэффициенты в корреляциях Nu и Sh для одиночной капли;

Δa_{cp} – среднее значение в серии измерений;

$\Delta \tau_p$ – разница времени задержки микро-взрывного распада первой и последующих капель, с;

∇ – оператор набла;

δ – толщина пленки, м;

ε – степень черноты;

η – объемная концентрация жидкой фазы, %;

κ – температуропроводность, m^2/s ;

κ_s – кривизна поверхности, $1/m$;

μ – динамическая вязкость, $Pa \cdot s$;

ρ – плотность, kg/m^3 ;

$\rho_{total} = (\rho_g + \rho_v)$ – плотность смеси паров топлива и воздуха, kg/m^3 ;

σ – поверхностное натяжение, N/m ;

σ_0 – межфазное натяжение, N/m ;

σ_c – постоянная Стефана-Больцмана, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$;

τ_{bubble} – времена роста пузыря, с;

τ_{full} – времена полного распада капель, с;

τ_{ign} – времена задержки зажигания, с;

τ_p – времена задержки микро-взрывного распада, с;

\vec{v} – вектор скорости, m/s .

Индексы:

0 – начальные условия;

l – жидкость;

конв – конвективный;

конд – кондуктивный;

рад – радиационный;

a – воздух;

amb (∞) – окружающая среда;

b (B) – кипение;

bubble – пузырь;

cd – вторичные капли;

cd_av – средний размер вторичных капель;

cell – ячейка;

d – капля;

eff – эффективное значение;

f – топливо;

g – газ;

i – номер фазы;

in – дисперсная фаза;

j – номер газовой фазы;

k – номер капли;

N – начало взрывного кипения воды;

SH – перегрев;

s – поверхность;

sub – подложка;

v – пары;

w – вода.

Список процитированной литературы

1. Sazhin, S.S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems / S.S. Sazhin // *Fuel*. – 2017. – V. 196. – P. 96-101.
2. Kalogirou, S.A. Seawater desalination using renewable energy sources / S.A. Kalogirou // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2005. – V. 31. – P. 242-281.
3. Shannon, M.A. Science and technology for water purification in the coming decades / M.A. Shannon, P.W. Bohn, M. Elimelech, J.G. Georgiadis, B.J. Mariñas, A.M. Mayes // *Nature*. – 2008. – V. 452. – P. 301-310.
4. Romero, R.J. Optimal water purification using low grade waste heat in an absorption heat transformer / R.J. Romero, A. Rodríguez-Martínez // *Desalination*. – 2008. – V. 220. – P. 506-513.
5. Strizhak, P.A. The integral characteristics of the deceleration and entrainment of water droplets by the counter flow of high-temperature combustion products / P.A. Strizhak, R.S. Volkov // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2016. – V. 75. – P. 54-65.
6. Volkov, R.S. Motion of water droplets in the counter flow of high-temperature combustion products / R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 54, № 1. – P. 193–207.
7. Kuznetsov, G.V. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests / G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – V. 121. – P. 398–409.
8. Suzuki, Y. Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets / Y. Suzuki, T. Harada, H. Watanabe, M. Shoji, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2011. – V. 33, № 2. – P. 2063-2070.
9. Tarlet, D. Comparison between unique and coalesced water drops in micro-explosions scanned by differential calorimetry / D. Tarlet, C. Josset, J. Bellettre // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – V. 95. – P. 689-692.
10. Watanabe, H. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel / H. Watanabe, T. Harada, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2009. – V. 52, № 15-16. – P. 3676-3684.

11. Yin, Z. Responses of combustor surface temperature to flame shape transitions in a turbulent bi-stable swirl flame / Z. Yin, P. Nau, W. Meier // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. – V. 82. – P. 50-57.
12. Nau, P. Infrared absorption spectrometer for the determination of temperature and species profiles in an entrained flow gasifier / P. Nau, P. Kutne, G. Eckel, W. Meier, C. Hotz, S. Fleck // *Applied Optics*. – 2017. – V. 56. – P. 2982-2990.
13. Warncke, K. Experimental and numerical investigation of the primary breakup of an airblasted liquid sheet / K. Warncke, S. Gepperth, B. Sauera, A. Sadiki, J. Janicka, R. Koch, H.-J. Bauer // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2017. – V. 91. – P. 208-224.
14. Tarlet, D. The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion / D. Tarlet, C. Allouis, J. Bellettre // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. – V. 107. – P. 179-183.
15. Tarlet, D. Distribution of thermal energy of child-droplets issued from an optimal micro-explosion / D. Tarlet, E. Mura, C. Josset, J. Bellettre, C. Allouis, P. Massoli // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 77. – P. 1043-1054.
16. Kim, A.V. Molecular dynamics study of the volumetric and hydrophobic properties of the amphiphilic molecule C_8E_6 / A.V. Kim, N.N. Medvedev, A. Geiger // *Journal of Molecular Liquids*. – 2014. – V. 189. – P. 74-80.
17. Voloshin, V.P. Calculation of the volumetric characteristics of biomacromolecules in solution by the Voronoi-Delaunay technique / V.P. Voloshin, A.V. Kim, N.N. Medvedev, R. Winter, A. Geiger // *Biophysical Chemistry*. – 2014. – V. 192. – P. 1-9.
18. Volkov, R.S. Using Planar Laser Induced Fluorescence to explore the mechanism of the explosive disintegration of water emulsion droplets exposed to intense heating / R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2018. – V. 127. – P. 126-141.
19. Vysokomornaya, O.V. Breakup of heterogeneous water drop immersed in high-temperature air / O.V. Vysokomornaya, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – V. 127. – P. 1340-1345.
20. Strizhak, P.A. Evaporation, boiling and explosive breakup of oil–water emulsion drops under intense radiant heating / P.A. Strizhak, M.V. Piskunov, R.S. Volkov, J.C. Legros // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2017. – V. 127. – P. 72-80.

21. Piskunov, M.V. Using Planar Laser Induced Fluorescence to explain the mechanism of heterogeneous water droplet boiling and explosive breakup / M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2018. – V. 91. – P. 103-116.
22. Lavieille, P. Temperature measurements on droplets in monodisperse stream using laser-induced fluorescence / P. Lavieille, F. Lemoine, G. Lavergne, J.F. Virepinte, M. Lebouché // *Experiments in Fluids*. – 2000. – V. 29. – P. 429-437.
23. Castanet, G. Internal temperature distributions of interacting and vaporizing droplets / G. Castanet, A. Labergue, F. Lemoine // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2011. – V. 50, №. 7. – P. 1181-1190.
24. Castanet, G. Evaporation of closely-spaced interacting droplets arranged in a single row / G. Castanet, L. Perrin, O. Caballina, F. Lemoine // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – V. 93. – P. 788-802.
25. Lemoine, F. Temperature and chemical composition of droplets by optical measurement techniques: A state-of-the-art review / F. Lemoine, G. Castanet // *Experiments in Fluids*. – 2013. – V. 54. – P. 1572.
26. Akhmetbekov, Y.K. Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet / Y.K. Akhmetbekov, S.V. Alekseenko, V.M. Dulin, D.M. Markovich, K.S. Pervunin // *Experiments in Fluids*. – 2010. – V. 48. – P. 615-629.
27. Abram, C. High-speed planar thermometry and velocimetry using thermographic phosphor particles / C. Abram, B. Fond, A.L. Heyes, F. Beyrau // *Applied Physics B*. – 2013. – V. 111. – P. 155-160.
28. Nebuchinov, A.S. Combination of PIV and PLIF methods to study convective heat transfer in an impinging jet / A.S. Nebuchinov, Y.A. Lozhkin, A.V. Bilsky, D.M. Markovich // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. – V. 80. – P. 139-146.
29. Kuznetsov, G.V. Integral characteristics of water droplet evaporation in high temperature combustion products of typical flammable liquids using SP and IPI methods / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, R.S. Volkov, O.V. Vysokomornaya // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. – V. 17. – P. 218-234.
30. Watanabe, H. Numerical simulation of emulsified fuel spray combustion with puffing and micro-explosion / H. Watanabe, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura // *Combustion and Flame*. – 2010. – V. 157. – P. 839-852.

31. Tsue, M. Effect of gravity on onset of microexplosion for an oil-in-water emulsion droplet / M. Tsue, H. Yamasaki, T. Kadota, D. Segawa, M. Kono // Symposium (International) on Combustion. – 1998. – V. 27, №. 2. – P. 2587-2593.
32. Watanabe, H. Development of a mathematical model for predicting water vapor mass generated in micro-explosion / H. Watanabe, Y. Suzuki, T. Harada, H. Aoki, T. Miura // Energy. – 2011. – V. 36, №. 7. – P. 4089-4096.
33. Watanabe, H. An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet / H. Watanabe, Y. Suzuki, T. Harada, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura // Energy. – 2010. – V. 35, №. 2. – P. 806-813.
34. Tanimoto, D. Numerical simulation of secondary atomization of an emulsion fuel droplet due to puffing: Dynamics of wall interaction of a sessile droplet and comparison with a free droplet / D. Tanimoto, J. Shinjo // Fuel. – 2019. – V. 252. – P. 475-487.
35. Kadota, T. Microexplosion of an emulsion droplet during Leidenfrost burning / T. Kadota, H. Tanaka, D. Segawa, S. Nakaya, H. Yamasaki // Proceedings of the Combustion Institute. – 2007. – V. 31, №. 2. – P. 2125-2131.
36. Segawa, D. Water-coalescence in an oil-in-water emulsion droplet burning under microgravity / D. Segawa, H. Yamasaki, T. Kadota, H. Tanaka, H. Enomoto, M. Tsue // Proceedings of the Combustion Institute. – 2000. – V. 28, №. 1. – P. 985-990.
37. Li, H. Experimental investigation on microexplosion of single isolated burning droplets containing titanium tetraisopropoxide for nanoparticle production / H. Li, C.D. Rosebrock, N. Riefler, T. Wriedt, L. Mädler // Proceedings of the Combustion Institute. – 2017. – V. 36, №. 1. – P. 1011-1018.
38. Ogunkoya, D. Performance, combustion, and emissions in a diesel engine operated with fuel-in-water emulsions based on lignin / D. Ogunkoya, S. Li, O.J. Rojas, T. Fanga // Applied Energy. – 2015. – V. 154. – P. 851-861.
39. Rubio, M.A. Microexplosions and ignition dynamics in engineered aluminum/polymer fuel particles / M.A. Rubio, I.E. Gunduz, L.J. Groven, T.R. Sippel, C.W. Han, R.R. Unocic, V. Ortolan, S.F. Son // Combustion and Flame. – 2017. – V. 176. – P. 162-171.
40. Wang, C.H. Combustion and microexplosion of freely falling multicomponent droplets / C.H. Wang, X.Q. Liu, C.K. Law // Combustion and Flame. – 1984. – V. 56, №. 2. – P. 175-197.

41. Jackson, G.S. Combustion of unsupported water-in-n-heptane emulsion droplets in a convection-free environment / G.S. Jackson, C.T. Avedisian // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1998. – V. 41, №. 16. – P. 2503-2515.
42. Xu, J. Droplet breakup of micro- and nano-dispersed carbon-in-water colloidal suspensions under intense radiation / J. Xu, L. Qiao, J. Gao, J. Chen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 78. – P. 267-276.
43. Hoxie, A. Microexplosive combustion behavior of blended soybean oil and butanol droplets / A. Hoxie, R. Schoo, J. Braden // *Fuel*. – 2014. – V. 120. – P. 22-29.
44. Lasheas, J.C. Effect of the ambient pressure on the explosive burning of emulsified and multicomponent fuel droplets / J.C. Lasheas, L.T. Yap, F.L. Dryer // *Symposium (International) on Combustion*. – 1985. – V. 20. – P. 1761-1772.
45. Law, C.K. A model for the combustion of oil/water emulsion droplets / C.K. Law // *Combustion Science and Technology*. – 1977. – V. 17. – P. 29-38.
46. Zeng, Y. Modeling droplet breakup processes under micro-explosion conditions / Y. Zeng, C.F.F. Lee // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – V. 31. – P. 2185-2193.
47. Mura, E. Experimental study of the water in oil emulsions features by differential scanning calorimetry analysis / E. Mura, C. Josset, K. Loubar, J. Bellettre, P. Massoli // *Applied Energy*. – 2012. – V. 97. – P. 834-840.
48. Maqua, C. Bicomponent droplets evaporation: Temperature measurements and modelling / C. Maqua, G. Castanet, F. Lemoine // *Fuel*. – 2008. – V. 87. – P. 2932-2942.
49. Mura, E. Emulsion droplet micro-explosion: Analysis of two experimental approaches / E. Mura, R. Calabria, V. Califano, P. Massoli, J. Bellettre // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2014. – V. 56. – P. 69-74.
50. Moussa, O. Insight of a water-in-oil emulsion drop under Leidenfrost heating using laser-induced fluorescence optical diagnostics / O. Moussa, D. Francelino, D. Tarlet, P. Massoli, J. Bellettre // *Atomization and Sprays*. – 2019. – V. 29. – P. 1-17.
51. Tarlet, D. Prediction of micro-explosion delay of emulsified fuel droplets / D. Tarlet, J. Bellettre, M. Tazerout, C. Rahmouni // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2009. – V. 48, №2. – P. 449-460.

52. Mura, E. Effect of dispersed water droplet size in microexplosion phenomenon for water in oil emulsion / E. Mura, C. Josset, K. Loubar, G. Huchet, J. Bellettre // *Atomization and Sprays*. – 2010. – V. 20, №9. – P. 791-799.
53. Lin, B.J. Emulsification analysis of bio-oil and diesel under various combinations of emulsifiers / B.J. Lin, W.-H. Chen, W.M. Budzianowski, C.-T. Hsieh, P.-H. Lin // *Applied Energy*. – 2016. – V. 178. – P. 746-757.
54. Zhang, Y. A new puffing model for a droplet of butanol-hexadecane blends / Y. Zhang, Y. Huang, R. Huang, S. Huang, Y. Ma, S. Xu, Z. Wang // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – V. 133. – P. 633-644.
55. Shen, S. An experimental investigation of the heating behaviors of droplets of emulsified fuels at high temperature / S. Shen, K. Sun, Z. Che, T. Wang, M. Jia, J. Cai // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – V. 161. – P. 114059.
56. Chen, G.B. Micro-explosion and burning characteristics of a single droplet of pyrolytic oil from castor seeds / G.B. Chen, Y.H. Li, C.H. Lan, H.T. Lin, Y.C. Chao // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – V. 114. – P. 1053-1063.
57. Fu, W.B. A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water / W.B. Fu, L.Y. Hou, L. Wang, F.H. Ma // *Fuel Processing Technology*. – 2002. – V. 79. – P. 107-119.
58. Luo, X. Breakup modes and criterion of droplet with surfactant under direct current electric field / X. Luo, X. Huang, H. Yan, D. Yang, J. Wang, L. He // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2018. – V. 132. – P. 822-830.
59. Yan, Y. The micro-explosion strength of emulsified heavy oil droplets in catalytic cracking process / Y. Yan, L. Chen, J. Xu, M. Ren, J. Da, F. Cao // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. – 2016. – V. 109. – P. 90-96.
60. Meng, K. Comparison of ignition, injection and micro - Explosion characteristics of RP-3/ethanol and biodiesel / ethanol mixed drops / K. Meng, W. Fu, F. Li, Y. Lei, Q. Lin, G. Wang // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93. – P. 152-164.
61. Wang, Z.F. Experimental investigation on the Leidenfrost phenomenon of droplet impact on heated silicon carbide surfaces / Z.F. Wang, J. Xiong, W. Yao, W. Qu, Y. Yang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – V. 128. – P. 1206-1217.
62. Cen, C. Experimental investigation on the sputtering and micro-explosion of emulsion fuel droplets during impact on a heated surface / C. Cen, H. Wu, C.F. Lee, L.

- Fan, F. Liu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – V. 132. – P. 130-137.
63. Ismael, M.A. The effect of fuel injection equipment on the dispersed phase of water-in-diesel emulsions / M.A. Ismael, M.R. Heikal, A.R.A. Aziz, F. Syah, E.Z. Zainal, C. Crua // *Applied Energy*. – 2018. – V. 222. – P. 762-771.
64. Ismael, M.A. Investigation of puffing and micro-explosion of water-in-diesel emulsion spray using shadow imaging / M.A. Ismael, M.R. Heikal, A.R.A. Aziz, C. Crua, M. El-Adawy, Z. Nissar, M.B. Baharom, E.Z. Zainal, Firmansyah // *Energies*. – 2018. – V. 11. – P. 2281.
65. Yahaya Khan, M. Puffing and Microexplosion Behavior of Water in Pure Diesel Emulsion Droplets During Leidenfrost Effect / M. Yahaya Khan, Z.A. Abdul Karim, A.R.A. Aziz, M.R. Heikal, C. Crua // *Combustion Science and Technology*. – 2017. – V. 189. – P. 1186-1197.
66. Mukhtar, M.N.A. Tri-fuel emulsion with secondary atomization attributes for greener diesel engine – A critical review / M.N.A. Mukhtar, F.Y. Hagos, M.M. Noor, R. Mamat, A. Adam Abdullah, A.R.A. Aziz // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – V. 111. – P. 490-506.
67. Jhalani, A. A comprehensive review on water-emulsified diesel fuel: chemistry, engine performance and exhaust emissions / A. Jhalani, D. Sharma, S.L. Soni, P.K. Sharma, S. Sharma // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – V. 26. – P. 4570–4587.
68. Gopidesi, R.K. A review on emulsified fuels and their application in diesel engine / R.K. Gopidesi, P.S. Rajaram // *International Journal of Ambient Energy*. – 2019.
69. Rao, D.C.K. Bubble dynamics and atomization mechanisms in burning multi-component droplets / D.C.K. Rao, S. Karmakar, S. Basu // *Physics of Fluids*. – 2018. – V. 30. – P. 067101.
70. Rao, D.C.K. Experimental investigations on nucleation, bubble growth, and micro-explosion characteristics during the combustion of ethanol/Jet A-1 fuel droplets / D.C.K. Rao, S. Syam, S. Karmakar, R. Joarder // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. – V. 89. – P. 284-294.
71. Kapadia, H. Investigation of emulsion and effect on emission in CI engine by using diesel and bio-diesel fuel: A review / H. Kapadia, H. Brahmhatt, Y. Dabhi, S. Chourasia // *Egyptian Journal of Petroleum*. – 2019. – V. 28. – P. 323-337.

72. Nissar, Z. A model for puffing/microexplosions in water/fuel emulsion droplets / Z. Nissar, O. Rybdylova, S.S. Sazhin, M. Heikal, A.R.B.A. Aziz, M.A. Ismael // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 149. – P. 119208.
73. Sazhin, S.S. A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets / S.S. Sazhin, O. Rybdylova, C. Crua, M. Heikal, M.A. Ismael, Z. Nissar, A.R.B.A. Aziz // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – V. 131. – P. 815-821.
74. Shinjo, J. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets / J. Shinjo, J. Xia, L.C. Ganippa, A. Megaritis // *Physics of Fluids*. – 2014. – V. 26. – P. 103302.
75. Shinjo, J. Modeling temperature distribution inside an emulsion fuel droplet under convective heating: A key to predicting microexplosion and puffing / J. Shinjo, J. Xia, A. Megaritis, L.C. Ganippa, R.F. Cracknell // *Atomization and Sprays*. – 2016. – V. 26. – P. 551-583.
76. Antonov, D.V. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions / D.V. Antonov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2019. – V. 142. – P. 30-41.
77. Antonov, D. Impact of holder materials on the heating and explosive breakup of two-component droplets / D. Antonov, J. Bellettre, D. Tarlet, P. Massoli, O. Vysokomornaya, M. Piskunov // *Energies*. – 2018. – V. 11. – P. 3307.
78. Буланов, Н.В. Теплоотдача к эмульсии при высоком перегреве ее дисперсной фазы / Н.В. Буланов, В.П. Скрипов, Н.А. Шуравенко // *Инженерно-физический журнал*. – 1982. – Т. 42, № 2. – С. 235-239.
79. Павлов, П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей / П.А. Павлов. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – 248 с.
80. Скрипов, В.П. Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов. – М.: Наука, 1972. – 312 с.
81. Kozulin, I.A. The dynamics of explosive vaporization of a two-component liquid mixture / I.A. Kozulin, V.V. Kuznetsov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – V. 1359. – P. 012052.
82. Корягин, В.А. Сжигание водотопливных эмульсий и снижение вредных выбросов / В.А. Корягин. – СПб.: Недра, 1995. – 304 с.

83. Gasanov, B.M. Effect of the droplet size of an emulsion dispersion phase in nucleate boiling and emulsion boiling crisis / B.M. Gasanov, N.V. Bulanov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – V. 88. – P. 256-260.
84. Gasanov, B.M. Effect of the concentration and size of droplets of the dispersed phase of an emulsion on the character of heat exchange in a boiling emulsion / B.M. Gasanov, N.V. Bulanov // *High Temperature*. – 2014. – V. 52. – P. 86-92.
85. Antonov, D.V. Temperature and convection velocities in two-component liquid droplet until micro-explosion / D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, S.Ya. Misyura, P.A. Strizhak // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2019. – V. 109. – P. 109862.
86. Antonov, D. Dispersed phase structure and micro-explosion behavior under different schemes of water-fuel droplets heating / D. Antonov, M. Piskunov, P. Strizhak, D. Tarlet, J. Bellettre // *Fuel*. – 2020. – V. 259. – P. 116241.
87. Antonov, D.V. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets / D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, O. Rybdylova, S.S. Sazhin // *Combustion and Flame*. – 2019. – V. 210. – P. 479-489.
88. Antonov, D.V. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium / D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Acta Astronautica*. – 2019. – V. 160. – P. 258-269.
89. Antonov, D.V. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets / D.V. Antonov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 181. – P. 116023.
90. Sazhin, S.S. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets / S.S. Sazhin, T. Bar-Kohany, Z. Nissar, D.V. Antonov, P.A. Strizhak, O. Rybdylova // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 161. – P. 120238.
91. Shlegel, N. Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations / N. Shlegel, P. Strizhak, D. Tarlet, J. Bellettre // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2019. – V. 108. – P. 104329.
92. Буланов, Н.В. Анализ эмульсий методом взрывного вскипания капелек дисперсной фазы / Н.В. Буланов, В.А. Хмыльнин // *Заводская лаборатория*. – 1994. – № 10. – С. 26-30.

93. Ithnin, A.M. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study / A.M. Ithnin, H. Noge, H.A. Kadir, W. Jazair // *Journal of the Energy Institute*. – 2014. – V. 87, № 4. P. 273-288.
94. Ivanov, V.M. Experimental investigation of this combustion process of natural and emulsified liquid fuels / V.M. Ivanov, P.I. Nefedov // *NASA technical translation*. – 1962. – V. 19. – P. 35-45.
95. Байдаков, В.Г. Перегрев криогенных жидкостей / В.Г. Байдаков. – Екатеринбург: УрО АН СССР, 1988. – 248 с.
96. Иванов, В.М. Топливные эмульсии / В.М. Иванов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 216 с.
97. Гаврилов, П.М. Динамика фазовых переходов при вскипании перегретой жидкости / П.М. Гаврилов // *Теплофизика высоких температур*. – 1999. – Т. 37, № 4. – С. 602-605.
98. Misyura, S.Y. Evaporation of a sessile water drop and a drop of aqueous salt solution / S.Y. Misyura // *Scientific Reports*. – 2017. – V. 7. – P. 14759.
99. Misyura, S.Y. Evaporation and heat and mass transfer of a sessile drop of aqueous salt solution on heated wall / S.Y. Misyura // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 116. – P. 667-674.
100. Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Shvartsberg V.M., Chernov A.A., Yakimov S.A., Koutsenogii K.P., Makarov V.I. Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology / O.P. Korobeinichev, A.G. Shmakov, V.M. Shvartsberg, A.A. Chernov, S.A. Yakimov, K.P. Koutsenogii, V.I. Makarov // *Fire Safety Journal*. – 2012. – V. 51. – P. 102-109.
101. Varaksin, A.Y. Fluid dynamics and thermal physics of two-phase flows: Problems and achievements / A.Y. Varaksin // *High Temperature*. – 2013. – V. 51. – P. 377-407.
102. Kichatov, B. Experimental study of foamed emulsion combustion: Influence of solid microparticles, glycerol and surfactant / B. Kichatov, A. Korshunov, A. Kiverin, E. Son // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – V. 166. – P. 77-85.
103. Salgansky, E.A. Coal dust gasification in the filtration combustion mode with syngas production / E.A. Salgansky, A.Y. Zaichenko, D.N. Podlesniy, M.V. Salganskaya, M. Toledo // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – V. 42, № 16. – P. 11017-11022.

104. Zhukov, V.E., Dynamics of interphase surface of self-sustaining evaporation front in liquid with additives of nanosized particles / V.E. Zhukov, A.N. Pavlenko, M.I. Moiseev, D.V. Kuznetsov // *High Temperature*. – 2017. – V. 55. – P. 79–86.
105. Sazhin, S.S. Order reduction in models of spray ignition and combustion / S.S. Sazhin, E. Shchepakina, V. Sobolev // *Combustion and Flame*. – 2018. – V. 187. – P. 122-128.
106. Kuznetsov, G.V. Unsteady temperature fields of evaporating water droplets exposed to conductive, convective and radiative heating / G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – V. 131. – P. 340-355.
107. Volkov, R.S. The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 79. – P. 838-845.
108. Volkov, R.S. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2015. – V. 88. – P. 193-200.
109. Volkov, R.S. Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, J.C. Legros, P.A. Strizhak // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – V. 95. – P. 184-197.
110. Snegirev, A.Y. Transient temperature gradient in a single-component vaporizing droplet / A.Y. Snegirev // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. – V. 65. – P. 80-94.
111. Vysokomornaya, O.V. Evaporation of Water Droplets in a High-Temperature Gaseous Medium / O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2016. – V. 89. – P. 141-151.
112. Goodger, E.M. Gas Turbines II: Some Fundamentals of Combustion / E.M. Goodger // *The aeronautical journal*. – 1955. – V. 59. – P. 714.
113. Fuchs, N.A. Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media / N.A. Fuchs, J.N. Pratt, R.H. Sabersky // *Journal of applied mechanics*. – 1960. – V. 27. – P. 759-760.

114. Ranz, W. Evaporation from drops - Part II / W. Ranz, W. Marshall // *Chemical Engineering Progress*. – 1952. – V. 48. – P. 173-180.
115. Vershinina, K.Y. The ignition parameters of the coal-water slurry droplets at the different methods of injection into the hot oxidant flow / K.Y. Vershinina, R.I. Egorov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 107. – P. 10-20.
116. Misyura, S.Y. Non-isothermal evaporation in a sessile droplet of water-salt solution / S.Y. Misyura // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2018. – V. 124. – P. 76-84.
117. Volkov, R.S. Movement and evaporation of water droplets under conditions typical for heat-exchange chambers of contact water heaters / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63. – P. 666-673.
118. Meng, K. Microexplosion and ignition of biodiesel/ethanol blends droplets in oxygenated hot co-flow / K. Meng, Y. Wu, Q. Lin, F. Shan, W. Fu, K. Zhou, T. Liu, L. Song, F. Li // *Journal of the Energy Institute*. – 2019. – V. 92, № 5. – P. 1527-1536.
119. Pan, K.L. On droplet combustion of biodiesel fuel mixed with diesel/alkanes in microgravity condition / K.L. Pan, J.W. Li, C.P. Chen, C.H. Wang // *Combustion and Flame*. – 2009. – V. 156, № 10. – P. 1926-1936.
120. Hou, S.S. Microexplosion and ignition of droplets of fuel oil/bio-oil (derived from lauan wood) blends / S.S. Hou, F.M. Rizal, T.H. Lin, T.Y. Yang, H.P. Wan // *Fuel*. – 2013. – V. 113. – P. 31-42.
121. Wang, C.H. On the burning and microexplosion of collision-generated two-component droplets: Miscible fuels / C.H. Wang, W.G. Hung, S.Y. Fu, W.C. Huang, C.K. Law // *Combustion and Flame*. – 2003. – V. 134, №3. – P. 289-300.
122. Wang, C.H. Combustion and microexplosion of freely falling multicomponent droplets / C.H. Wang, X.Q. Liu, C.K. Law // *Combustion and Flame*. – 1984. – V. 56, №2. – P. 175-197.
123. Li, S. Quantitative observation on characteristics and breakup of single superheated droplet / S. Li, Y. Zhang, W. Qi, B. Xu // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. – V. 80. – P. 305-312.
124. Shao, C. Direct numerical simulation of droplet breakup in homogeneous isotropic turbulence: The effect of the Weber number / C. Shao, K. Luo, Y. Yang, J. Fan // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2018. – V. 107. – P. 263-274.

125. Strotos, G. Numerical investigation of aerodynamic droplet breakup in a high temperature gas environment / G. Strotos, I. Malgarinos, N. Nikolopoulos, M. Gavaises // *Fuel*. – 2016. – V. 181. – P. 450-462.
126. Law, C.K. Internal boiling and superheating in vaporizing multicomponent droplets / C.K. Law // *AIChE Journal*. – 1978. – V. 24, № 4. – P. 626-632.
127. Zeng, Y. Modeling droplet breakup processes under micro-explosion conditions / Y. Zeng, C.F. Lee // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – V. 31, № 2. – P. 2185-2193.
128. Antonov, D.V. Influence of solid nontransparent inclusion shape on the breakup time of heterogeneous water drops / D.V. Antonov, O.V. Vysokomornaya, M.V. Piskunov, R.M. Fedorenko, W.M. Yan // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2019. – V. 101. – P. 21-25.
129. Shinjo, J. Combustion characteristics of a single decane/ethanol emulsion droplet and a droplet group under puffing conditions / J. Shinjo, J. Xia // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2017. – V. 36, № 2. – P. 2513-2521.
130. Antonov, D.V. Explosive disintegration of two-component drops under intense conductive, convective, and radiant heating / D.V. Antonov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – V. 152. – P. 409-419.
131. Koh, Y.T. Immunological consequences of using three different clinical/laboratory techniques of emulsifying peptide-based vaccines in incomplete Freund's adjuvant / Y.T. Koh, S.A. Higgins, J.S. Weber, W.M. Kast // *Journal of Translational Medicine*. – 2006. – V. 4. – P. 42.
132. Mura, E. Study of the micro-explosion temperature of water in oil emulsion droplets during the Leidenfrost effect / E. Mura, P. Massoli, C. Josset, K. Loubar, J. Belletre // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2006. – V. 4. – P. 42.
133. Yaws, L.C. Yaws' handbook of thermodynamic and physical properties of chemical compounds / L.C. Yaws // *Knovel*. – 2003.
134. Antonov, D. Analysis of statistical data on drop collisions in an aerosol flow during experiments / D. Antonov, O. Vysokomornaya, M. Piskunov, N. Shlegel // *EPJ Web of Conferences*. – 2019. – V. 196. – P. 0013.
135. Антонов, Д.В. Характеристики аэрозольного облака, образующегося при микровзрывном разрушении двухжидкостной капли / Д.В. Антонов, Г.В.

Кузнецов, П.А. Стрижак // Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45, № 16. – С. 14-17.

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

137. Volkov, R.S. Temperature and velocity fields of the gas-vapor flow near evaporating water droplets / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – V. 134. – P. 337-354.

138. Charogiannis, A. Laser induced phosphorescence imaging for the investigation of evaporating liquid flows / A. Charogiannis, F. Beyrau // Experiments in Fluids. – 2013. – V. 54. – P. 1518.

139. Lindén, J. Investigation of potential laser-induced heating effects when using thermographic phosphors for gas-phase thermometry / J. Linden, N. Takada, B. Johansson, M. Richter, M. Alden // Applied Physics B. – 2009. – V. 96. – P. 237-240.

140. Strizhak, P.A. Application of the laser induced phosphorescence method to the analysis of temperature distribution in heated and evaporating droplets / Strizhak P.A., Volkov R.S., Antonov D.V., Castanet G., Sazhin S.S. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – V. 163. – P. 120421.

141. Voytkov, I.S. Temperature and velocity of the gas-vapor mixture in the trace of several evaporating water droplets / I.S. Voytkov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak // Journal of Heat Transfer. – 2019. – V. 141, №1. – P. 011502.

142. Volkov, R.S. Research of temperature fields and convection velocities in evaporating water droplets using Planar Laser-Induced Fluorescence and Particle Image Velocimetry / R.S. Volkov, P.A. Strizhak // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – V. 97. – P. 392-407.

143. Morozumi, Y. Effect of Physical Properties on Microexplosion Occurrence in Water-in-Oil Emulsion Droplets / Y. Morozumi, Y. Saito // Energy and Fuels. – 2010. – V. 24, №3. – P. 1854-1859.

144. Glushkov, D.O. Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review) / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, M.Y. Chernetskii // Thermal Engineering. – 2016. – V. 63. – P. 707-717.

145. Glushkov, D.O. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste / D.O. Glushkov, S.Y. Lyrshchikov, S.A. Shevyrev, P.A. Strizhak // *Energy and Fuels*. – 2016. – V. 30. – P. 3441-3450.
146. Yanovsky, V.A. Rheological properties of inverse emulsions stabilized by ethanalamides of tall oil fatty acids / V.A. Yanovsky, M.O. Andropov, R.S. Fakhislamova, R.A. Churkin, K.M. Minaev, O.S. Ulyanova // *MATEC Web of Conferences*. – 2016. – V. 85. – P. 01020.
147. Bąk, A. Interfacial and surface tensions of toluene/water and air/water systems with nonionic surfactants Tween 20 and Tween 80 / A. Bąk, W. Podgórska // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2016. – V. 504. – P. 414-425.
148. Bąk, A. Investigation of drop breakage and coalescence in the liquid–liquid system with nonionic surfactants Tween 20 and Tween 80 / A. Bąk, W. Podgórska // *Chemical Engineering Science*. – 2012. – V. 74. – P. 181-191.
149. Finotello, G. The dynamics of milk droplet--droplet collisions / G. Finotello, R.F. Kooiman, J.T. Padding, K.A. Buist, A. Jongsma, F. Innings, J.A.M. Kuipers // *Experiments in Fluids*. – 2018. – V. 59. – P. 17.
150. Ayhan, V. Experimental investigation on using emulsified fuels with different biofuel additives in a DI diesel engine for performance and emissions / V. Ayhan, S. Tunca // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – V. 129. – P. 841-854.
151. Egorov, R.I. Energetic and ecological effect of small amount of metalline powders used for doping waste-derived fuels / R.I. Egorov, T.R. Valiullin, P.A. Strizhak // *Combustion and Flame*. – 2018. – V. 193. – P. 335-343.
152. Kichatov, B. Combustion of foamed emulsion prepared via bubbling of oxygen-nitrogen gaseous mixture through the oil-in-water emulsion / B. Kichatov, A. Korshunov, A. Kiverin, N. Medvetskaya // *Fuel Processing Technology. Combustion and Flame*. – 2019. – V. 186. – P. 25-34.
153. Chen, R.-H. Diesel-diesel and diesel-ethanol drop collisions / R.-H. Chen // *Applied Thermal Engineering*. – 2007. – V. 27, № 2-3. – P. 604-610.
154. Glushkov, D.O. Simultaneous ignition of several droplets of coal–water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow / D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 152. – P. 22-33.

155. Antonov, D.V. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium / D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Acta Astronautica*. – 2019. – V. 160. – P. 258-269.
156. Suzuki, Y. Visualization of Internal Behavior in Emulsified Fuel Droplets and the Effect of Surfactant on Secondary Atomization / Y. Suzuki, T. Harada, M. Shoji, H. Watanabe, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura // *Kagaku Kogaku Ronbunshu*. – 2010. – V. 36, № 6. – P. 557-565.
157. Strizhak, P. Measuring temperature of emulsion and immiscible two-component drops until micro-explosion using two-color LIF / P. Strizhak, R. Volkov, O. Moussa, D. Tarlet, J. Bellettre // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 163. – P. 120505.
158. Castanet, G. Heat and mass transfer of combusting monodisperse droplets in a linear stream / G. Castanet, M. Lebouché, F. Lemoine // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 48, № 16. – P. 3261-3275.
159. Fostiropoulos, S. A simple model for breakup time prediction of water-heavy fuel oil emulsion droplets / S. Fostiropoulos, G. Strotos, N. Nikolopoulos, M. Gavaises // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 48, № 16. – P. 3261-3275.
160. Goyal, N. Bubble entrapment during head-on binary collision with large deformation of unequal-sized tetradecane droplets / N. Goyal, J. Shaikh, A. Sharma // *Physics of Fluids*. – 2020. – V. 32. – P. 122114.
161. Fostiropoulos, S. Numerical investigation of heavy fuel oil droplet breakup enhancement with water emulsions / S. Fostiropoulos, G. Strotos, N. Nikolopoulos, M. Gavaises // *Fuel*. – 2020. – V. 278. – P. 118381.
162. Avulapati, M.M. Puffing and micro-explosion of diesel-biodiesel-ethanol blends / M.M. Avulapati, L.C. Ganippa, J. Xia, A. Megaritis // *Fuel*. – 2016. – V. 166. – P. 59-66.
163. Shinjo, J. Modeling temperature distribution inside an emulsion fuel droplet under convective heating: A key to predicting microexplosion and puffing // *Atomization and Sprays*. – 2016. – V. 26, № 6. – P. 551-583.
164. Sazhin, S. *Droplets and sprays* / S. Sazhin. – Springer-Verlag London, 2014. – 345 p.

165. Tonini, S. An analytical model of liquid drop evaporation in gaseous environment / S. Tonini, G.E. Cossali // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2012. – V. 57. – P. 45-53.
166. Antonov, D.V. Puffing/micro-explosion in rapeseed oil/water droplets: The effects of coal micro-particles in water / D.V. Antonov, P.A. Strizhak, R.M. Fedorenko, Z. Nissar, S.S. Sazhin // *Fuel*. – 2021. – V. 289. – P. 119814.
167. Strizhak, P.A. Heating and evaporation of suspended water droplets: Experimental studies and modelling / P.A. Strizhak, R.S. Volkov, G. Castanet, F. Lemoine, O. Rybdylova, S.S. Sazhin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 127. – P. 92-106.
168. Saufi, A.E. An experimental and CFD modeling study of suspended droplets evaporation in buoyancy driven convection / A.E. Saufi, R. Calabria, F. Chiariello, A. Frassoldati, A. Cuoci, T. Faravelli, P. Massoli // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – V. 375. – P. 122006.
169. Skripov, P.V. The phenomenon of superheat of liquids: In memory of Vladimir P. Skripov / P.V. Skripov, A.P. Skripov // *International Journal of Thermophysics*. – 2010. – V. 31. – P. 816-830.
170. Kadota, T. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion / T. Kadota, H. Yamasaki // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2002. – V. 28, № 5. – P. 385-404.
171. Iida, Y. Boiling nucleation on a very small film heater subjected to extremely rapid heating / Y. Iida, K. Okuyama, K. Sakurai // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1994. – V. 37, № 17. – P. 2771-2780.
172. Glod, S. An investigation of microscale explosive vaporization of water on an ultrathin Pt wire / S. Glod, D. Poulikakos, Z. Zhao, G. Yadigaroglu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2002. – V. 45, № 2. – P. 367-379.
173. Rosenthal, M.W. An Experimental Study of Transient Boiling / M.W. Rosenthal // *Nuclear Science and Engineering*. – 1957. – V. 2, № 5. – P. 640-656.
174. Ching, E.J. Measurement of the bubble nucleation temperature of water on a pulse-heated thin platinum film supported by a membrane using a low-noise bridge circuit / E.J. Ching, C.T. Avedisian, M.J. Carrier, R.C. Cavicchi, J.R. Young, B.R. Land // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 79. – P. 82-93.

175. Sakurai, A. Transient pool boiling heat transfer: Part 1: Incipient boiling superheat / A. Sakurai, M. Shiotsu // *Journal of Heat Transfer*. – 1977. – V. 99, № 4. – P. 547-553.
176. Su, G.Y. Transient boiling of water under exponentially escalating heat inputs. Part I: Pool boiling / G.-Y. Su, M. Bucci, T. McKrell, J. Buongiorno // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – V. 96. – P. 667-684.
177. Bar-Kohany, T. Nucleation temperature under various heating rates / T. Bar-Kohany, Y. Amsalem // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 126. – P. 411-415.
178. Hirt, C. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries / C. Hirt, B. Nichols // *Journal of Computational Physics*. – 1981. – V. 39, № 1. – P. 201-225.
179. Шебелева, А.А. Математическое моделирование двухфазных потоков VOF методом с учетом динамического контактного угла / А.А. Шебелева, А.В. Минаков // *Современная наука исследования, идеи, результаты, технологии*. – 2015. – Т. 16, № 1. – С. 133-138.
180. Brackbill, J. A continuum method for modeling surface tension / J. Brackbill, D. Kothe, C. Zemach // *Journal of Computational Physics*. – 1992. – V. 100, № 2. – P. 335-354.
181. Volkov, R.S. Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – V. 85. – P. 1-11.
182. Авксентюк, Б.П. Механизм начальной стадии роста парового пузыря при перегревах жидкости, близких к предельным / Б.П. Авксентюк // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1995. – Т. 36, № 3. – С. 130-133.
183. Sirignano, W.A. Advances in droplet array combustion theory and modeling / W.A. Sirignano // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2014. – Т. 42. – С. 54-86.

Перечень основных публикаций по теме диссертации

1. Sazhin S.S. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets / Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D., Strizhak P.A., Rybdylova O.D. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 161. – P. 120228.
2. Antonov D.V. Puffing/micro-explosion in rapeseed oil/water droplets: The effects of coal micro-particles in water / Antonov D.V., Strizhak P.A., Fedorenko R.M., Nissar Z., Sazhin S.S. // Fuel. – 2021. – Vol. 289. – P. 119814.
3. Antonov D.V. Micro-explosive droplet fragmentation of environmentally promising coal-water slurries containing petrochemicals / Antonov D.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A., Romanov D.S. // Fuel. – 2021. – Vol. 283. – P. 118949.
4. Antonov D.V. Dispersed phase structure and micro-explosion behavior under different schemes of water-fuel droplets heating / Antonov D., Piskunov M., Strizhak P., Tarlet D., Bellettre J. // Fuel. – 2020. – Vol. 259. – P. 116241.
5. Antonov D.V. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets / Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. // Combustion and Flame. – 2019. – Vol. 210. – P. 479-489.
6. Strizhak, P.A. Application of the laser induced phosphorescence method to the analysis of temperature distribution in heated and evaporating droplets / Strizhak P.A., Volkov R.S., Antonov D.V., Castanet G., Sazhin S.S. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 163. – P. 120421.
7. Antonov D.V. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions / Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – Vol. 142. – P. 30-41.
8. 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.
9. Антонов Д.В. Влияние схемы нагрева неоднородной капли на характеристики микровзрывной фрагментации / Антонов Д.В., Ребров А.К., Стрижак П.А. // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488, № 4. – С. 372–376.
10. Антонов Д.В. Характеристики аэрозольного облака, образующегося при микровзрывном разрушении двухжидкостной капли / Антонов Д.В., Кузнецов

Г.В., Стрижак П.А. // Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45, № 16. – С. 14–17.

11. Антонов Д.В. Микровзрывная фрагментация группы неоднородных капель топлив / Антонов Д.В., Стрижак П.А., Федоренко Р.М. // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, № 10. – С. 14–17.

12. Антонов Д.В. Интенсификация парообразования и вторичного измельчения капель огнетушащих составов / Антонов Д.В., Стрижак П.А. // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, № 3. – С. 23–26.

13. Антонов Д.В. О возможных перспективах применения эффектов взрывного дробления капель воды при пожаротушении / Антонов Д.В., Войтков И.С., Высокоморная О.В., Пискунов М.В. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2017. – № 2. – С. 45–54.