

Школа Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
 ООП/ОПОП Автоматизация теплоэнергетических процессов
 Отделение НОЦ И.Н. Бутакова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества.

УДК 681.5:662.758.2-046.66

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ13	Разумов Дмитрий Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

**Планируемые результаты выпускника освоения образовательной программы
магистратуры по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания при предварительном анализе, проектировании, синтезе, ресурсоэффективной эксплуатации автоматизированных и автоматических систем управления теплоэнергетическими процессами, а также систем теплотехнических измерений и регистрации
ПК(У)-2	Способен разрабатывать комплекты проектной, конструкторской и эксплуатационной документации для сложных систем теплотехнических измерений и управления
ПК(У)-3	Способен интегрировать знания различных областей для разработки мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования
ПК(У)-4	Способен применять и совершенствовать фундаментальные и прикладные знания по современным динамично изменяющимся теплоэнергетическим технологиям, принципам, методам и системам их управления для прорывных научно-исследовательских работ
ПК(У)-5	Способен применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности, разрабатывать мероприятия по безопасности жизнедеятельности персонала и населения, предотвращать экологические нарушения
ПК(У)-6	Способен проводить теоретические и экспериментальные научные исследования термодинамических и физико-химических процессов в теплоэнергетике, а также систем их контроля и управления, интерпретировать, давать практические рекомендации по внедрению результатов исследований в производство, критически их интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований

ПК(У)-7	Способен руководить коллективом специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, разрабатывать мероприятия по предотвращению экологических нарушений
ПК(У)-8	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
 ООП/ОПОП Автоматизация теплоэнергетических процессов
 Отделение НОЦ И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ П.А. Стрижак
 (Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
5БМ13	Разумов Дмитрий Сергеевич

Тема работы:

АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	10.02.2013 №44-33/С

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	В рамках ВКР разрабатывается комплект проектной и конструкторской документации, а также программные алгоритмы и мнемосхемы для АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества. Результаты научных исследований используются для оптимизации процессов микро-взрывного измельчения капель топлив.
---------------------------------	---

Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке	<ol style="list-style-type: none"> 1. Исследовательские изыскания. 2. Системный анализ объекта автоматизации. 3. Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления. 4. Разработка документации АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества. 5. Разработка мнемосхем SCADA-системы для АСУ микро-взрывного измельчения капель
---	--

	<p>композиционных жидких топлив с применением воды разного качества.</p> <p>6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</p> <p>7. Социальная ответственность.</p>
Перечень графического материала	<p>1. Схема структурная.</p> <p>2. Схема функциональная.</p> <p>4. Спецификация приборов и средств автоматизации.</p> <p>5. Заказная спецификация приборов и средств автоматизации.</p> <p>6. Схема монтажная.</p> <p>7. Схема принципиальная электрическая.</p> <p>8. Перечень элементов щита управления лабораторным стендом.</p> <p>9. Сборочный чертеж щита управления.</p> <p>10. Спецификация щита управления лабораторным стендом дизельного ДВС.</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Якимова Татьяна Борисовна
Социальная ответственность	Сечин Андрей Александрович

Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:

Исследовательские изыскания (Researches of fragmentation of droplets of coal-water slurries containing petrochemicals under different heating methods)
--

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ13	Разумов Дмитрий Сергеевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 133 с., 24 рис., 34 табл., 81 источников, 1 прил.

Ключевые слова: лабораторный стенд, микро-взрывная фрагментация капель топлив, камера сгорания, автоматизированная система, микропроцессорные средства автоматизации.

Объектом разработки является: АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив

Цель работы – создание автоматизированной системы управления лабораторным стендом на базе камеры сгорания, условия в которой приближены к условиям внутри двигателей внутреннего сгорания

В ходе работы проводилось установление по результатам экспериментальных исследований режимов фрагментации капель с разным качеством дисперсной фазы (воды), а также интегральных характеристик процесса, выделение критических условий, при которых газонасыщение капель топлив способствует интенсификации распада.

В результате исследований: установлены характерные режимы существования при нагреве двухжидкостных капель; получены зависимости времени существования капли, времени задержки распада капли от температуры внешней газовой среды в диапазоне от 350 °С до 450 °С; выделены перспективные механизмы управления характеристиками распада капель за счет размещения в них готовых центров парообразования различного происхождения и выдержки определенного температурного режима.

Была разработана АСУ лабораторным стендом на базе камеры сгорания, данная система управления применима для научных исследований.

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	7
ВВЕДЕНИЕ	10
1 Научно-исследовательская работа	12
1.1 Цели и задачи исследования	16
1.2 Экспериментальная методика и материалы	16
1.3 Результаты	22
1.3.1 Режимы нагрева, испарения и фрагментации газонасыщенных капель.....	22
1.3.2 Временные характеристики фрагментации	32
1.3.3 Критические размеры пузырей перед распадом	35
1.3.4. Сравнение результатов моделирования и эксперимента	37
1.4 Выводы по разделу	41
2 Проектирование АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества	43
2.1 Анализ объекта автоматизации	43
2.2 Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления.....	44
2.3 Разработка функциональной схемы системы управления	45
2.4 Выбор технических средств системы управления, составление спецификации	47
2.4.1 Выбор датчиков температуры.....	47
2.4.2 Выбор датчиков давления	47
2.4.3 Выбор топливного насоса	48
2.4.4 Выбор вакууметрического насоса	49
2.4.5 Выбор газоанализатора.....	49
2.4.6 Выбор исполнительного механизма.....	50
2.4.7 Выбор программируемого логического контроллера	51
2.5 Составление перечней входных и выходных сигналов.....	52
2.6 Разработка принципиальной электрической схемы щита управления.....	53
2.7 Составление перечня элементов щита управления	55
2.8 Проектирование схемы внешних проводок	55
2.9 Разработка общего вида щита управления	56
2.10 Разработка фрагментов информационного, математического и программного обеспечений.....	57
2.11 Разработка экранных форм мнемосхем SCADA-системы.....	63
2.12 Выводы по разделу	64
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	66
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования	67
3.2 Анализ конкурентных технических решений	67

3.3 FAST - анализ	69
3.3.1 Выбор объекта FAST – анализа	69
3.3.2 Описание функций объекта	69
3.3.3 Определение значимости выполняемых функций объектом	70
3.3.4 Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования	71
3.3.5 Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и её анализ.....	72
3.4 Планирование научно-исследовательской работы	73
3.5 Бюджет научного исследования	76
3.5.1 Стоимость материальных затрат научно-технического исследования.....	76
3.5.2 Заработная плата исполнителей	77
3.5.3 Отчисления во внебюджетные фонды	79
3.5.4 Накладные расходы	80
3.5.5 Затраты на оборудование	80
3.5.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	82
3.6 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	82
3.7 Вывод по разделу	85
4 Социальная ответственность	88
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	88
4.1.2 Специальные правовые нормы трудового законодательства	89
4.1.3 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	89
4.2 Производственная безопасность	90
4.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов	90
4.2.1.1 Отклонение показателей микроклимата	92
4.2.1.2 Превышение уровня шума	92
4.2.1.3 Отсутствие или недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны	93
4.2.1.4 Расчет искусственного освещения	94
4.2.1.5 Опасность поражений электрическим током	97
4.2.1.6 Повышенная температура воздуха	99
4.2.1.7 Подвижные части производственного оборудования	99
4.2.1.8 Вещества, обладающие свойствами химического воздействия на организм человека	100
4.3 Экологическая безопасность.....	100
4.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	100
4.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.....	101
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	101

4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.....	102
4.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	102
4.5 Выводы по разделу	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
Список использованных источников	105
Приложение I.....	115

На отдельных листах:

ФЮРА.421000.010 ПЭ	Перечень элементов шкафа управления
ФЮРА.421000.010 СП	Спецификация оборудования шкафа управления
ФЮРА.421000.010 СО	Заказная спецификация ТСА
Графический материал:	На отдельных листах
ФЮРА.421000.010 С1	Схема структурная
ФЮРА.421000.010 С2	Схема функциональная
ФЮРА.421000.010 Э4	Схема электрическая соединений щита управления
ФЮРА.421000.010 С4	Схема монтажная внешних проводок
ФЮРА.421000.010 СБ	Сборочный чертеж щита управления
ФЮРА.421000.010 СБ-01...09	Сборочный чертеж камеры сгорания

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация технологического процесса – определенная организация оперативного управления, при котором управление производственным процессом осуществляется централизованно человеком оператором [1]. Стоит отметить, что использование автоматизированных систем является экономически выгодным шагом в системах. Для реализации автоматизации производственных процессов необходимо использовать различные типы устройств [2].

В рамках данной работы предусмотрено микро-взрывное измельчение капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества. Данная технология измельчения капель топлив, состоящих из двух и более разных видов, является привлекательной технологией для внедрения во многие отрасли промышленности. К преимуществам применения данной технологии можно отнести: уменьшение расхода топлива, стабилизация распыления топлива, снижение антропогенных выбросов, повышение динамических характеристик горения и снижение износа оборудования [3]. При использовании технологии микро-взрывного измельчения капли топлив дробятся до минимальных размеров: десятки и сотни микрон, это позволяет многократно увеличить площадь поверхности испарения и химического реагирования. При проведении экспериментальных исследований на проектируемом стенде необходимо получать истинные значения характеристик вторичных фрагментов, для достижения данных целей необходимо обеспечить безопасную, постоянную работу лабораторного стенда, обеспечить постоянство или изменение физических величин [5], такими величинами являются: температура внутри камеры сгорания, давление внутри камеры сгорания.

Получение экспериментальной и теоретической информационной базы характеристик распада и зажигания многокомпонентных топлив позволит разработать эффективные автоматизированные технологии топливоприготовления и сжигания в двигательных установках с микро-взрывной фрагментацией капель топлив [6].

Целью данной работы является создание автоматизированной системы управления лабораторным стендом на базе камеры сгорания, условия в которой приближены к условиям внутри двигателей внутреннего сгорания.

Основными задачами выпускной квалификационной работы являются:

- провести экспериментальное исследование влияния пузырьков углекислого газа и твердых частиц в двухжидкостных каплях на характеристики их микро-взрывной фрагментации;
- провести системный анализ объекта автоматизации;
- выбрать структуру автоматизированной системы регулирования;
- разработать функциональную схему АСУ;
- выбрать технические средства АСУ и составить заказную спецификацию;
- составить перечень входных и выходных сигналов;
- разработать принципиальную электрическую схему щита управления;
- составить перечень элементов щита управления;
- спроектировать схему внешних проводок;
- разработать сборочный чертеж щита управления;
- составить спецификацию щита управления;
- разработать фрагменты информационного, математического и программного обеспечений;
- разработать мнемосхемы SCADA-системы.

1 Научно-исследовательская работа

Газонасыщение жидкостей активно применяется во многих отраслях промышленности, исследуются новые способы его реализации и возможность использования различного рода газов для достижения технологических показателей [6,7]. В частности, газонасыщение в фармацевтике используется как способ обеспечения заданных и приобретения новых полезных медико-биологических свойств путем введения ксенона в воду, масла, эмульсии и др., а также растворения азота в маслах растительного происхождения с целью увеличения сроков их хранения [8]. В фармацевтической отрасли также применяется газонасыщение диоксидом углерода в качестве метода уменьшения размера фармацевтических соединений для повышения скорости их растворения и биодоступности [7]. Основное преимущество такого метода над распылительной сушкой очевидно – малое значение критической температуры диоксида углерода. Следовательно, дополнительные эффекты: отсутствие термического разложения чувствительных к нагреванию соединений, нетоксичность, негорючесть и дешевизна диоксида углерода [7]. Достаточно часто используется флотация растворенным воздухом (метод разделения жидкости и растворенных в ней твердых частиц) на очистных сооружениях при подготовке сырой воды для водоснабжения [9], в сельском хозяйстве [10], в пищевой [11], горнодобывающей [12] и нефтеперерабатывающей [13] отраслях промышленности. Флотация физически реализуется за счет наличия в жидкости (чаще всего воды) газовых пузырьков (т.е. насыщенной CO_2) [14]. Содержащиеся в такой жидкости взвешенные добавки поднимаются вместе с пузырьками газа на поверхность пленок, струй и капель жидкости [14].

Целесообразно выделить важную роль процесса газонасыщения в топливных технологиях. Компоненты топлива как окислителя, так и горючего, насыщаются нейтральными газами (чаще всего азотом) для обеспечения стабильного давления в баках при варьировании температуры окружающей среды [15]. Добавление в небольших количествах в биотопливо для дизельных двигателей кислородосодержащих составляющих, таких как метанол,

диметилкарбонат, диаэтиловый эфир, способствует снижению выбросов твердых частиц и NO_x [16]. Обводнение мазута также приводит к уменьшению антропогенных выбросов, при сжигании такого топлива за счет микро-взрывной фрагментации происходит быстрое (менее 0.1 мс) испарение воды из эмульсии и последующее разрушение исходной капли [17]. Также явление микро-взрыва применяется для интенсификации измельчения капель при распылении топлива [18]. При обоснованно выбранных условиях нагрева, спроектированных схемах их обеспечения и варьировании степени эмульгирования топлива можно эффективно управлять характеристиками микро-взрыва [18].

Результаты исследований, посвященных фрагментации капель жидкостей, насыщенных газом, представлены в [19–39]. Обосновано, что присутствие в жидкости растворенного диоксида углерода (чаще всего в составе воды и пузырьков воздуха) может эффективно снижать межфазное натяжение [19]. Уменьшение межфазного натяжения способствует интенсификации дробления капель жидкости [20,23] и топливных композиций [24] при повышении температуры газовой среды, что сопровождается усилением фазовых превращений, образованием паровой буферной зоны вокруг жидких фрагментов и увеличением давления в газовой фазе. В [23] изучалось испарение дистиллированной воды и соленой воды (содержание соли 3.5%) в высоковакуумном сосуде с эффектами взрывного вскипания. Установлено влияние на характеристики фрагментации таких факторов, как давление окружающей среды, теплового потока и степени перегрева [23]. Доказано, что по мере увеличения теплового потока время задержки фрагментации уменьшается, а количество вторичных фрагментов растет с уменьшением давления и увеличением степени перегрева [23]. Также следует отметить определяющую роль числа Вебера. Рост температуры газа сдвигает границу перехода к разрыву капли в сторону меньших чисел Вебера [20]. Для газонасыщенных капель эмульсий (CO_2 , воздухом и парами воды) важным аспектом является подвод меньшего количества энергии и минимальное значение времени установления режима частичной или полной фрагментации за счет микро-взрывного

дробления капель [25–27]. Фрагментация капель эмульсий в [25–27] реализована в условиях их повышенной концентрации и высоких температур. Чем больше разница между температурами кипения жидких компонентов, тем интенсивнее процессы микро-взрывного распада двухкомпонентных капель, что наглядно представлено на примере эмульсий керосина, дизеля, нефти и турбинного масла с водой [28–30].

Многие практические приложения (фармацевтика, микрокапсулирование и покрытие микрочастиц) требуют условий невысоких температур и небольшой энергии распыления при сохранении минимальных размеров и максимальной скорости движения потока капель, возможности масштабируемости и управляемости процессом распыления. Перспективный метод распыления путем разрушения тонких пленок жидкости газовыми струями предложен в [21]. В экспериментах [21] получены результаты для капель водопроводной воды. Обосновано, что этот метод подходит для различных жидкостей [22]. Аналогичный метод разрыва топливной пленки воздухом, на основе экспериментальных данных (объемом пузырьков и характеристиками разрыва топливной пленки) которого базируются математические модели, представлен [31,32]. Для анализа физических закономерностей микро-взрыва определялся энергетический баланс образующихся вторичных капель, в частности, их поверхностная и кинетическая энергия. По результатам установленных в экспериментах значений размера и скорости движения вторичных капель установлено, что оптимальным с точки зрения эффективности микро-взрыва (фрагментации), является условие превышения поверхностной энергии над кинетической [31,32]. Известна также модель микро-взрыва капель водотопливной эмульсии, основанная на решении уравнения теплопроводности [32]. В данной модели для упрощения расчетов не учитывается испарение, а теплопроводность и плотность жидкости считаются постоянными. Пороговым (критическим) условием микро-взрывной фрагментации считается достижение температуры поверхности капли условий кипения воды [28]. В случае гетерогенных капель применим метод Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF),

применение которого позволило обосновать, что достижение температуры кипения воды является ключевым условием распада гетерогенных капель [34]. Для случаев фрагментации несмешивающихся капель топлива, к примеру мазута, и воды применима численная модель [35], базирующаяся на уравнениях Навье-Стокса и сохранения энергии для несжимаемой жидкости. Сравнение прогнозов данной модели со случаями аэродинамического разрушения чистых капель при неизменности свойств и начальных условий выявило, что для исследуемого вязкого топлива микро-взрыв ускоряет дробление капель почти на порядок относительно аэродинамического дробления [35]. К примеру для относительно небольших чисел Вебера (менее 50) время распада эмульгированного топлива в 5 раз меньше по сравнению с условиями аэродинамического разрушения базового топлива без воды [36].

Продолжительность фрагментации также изучалась с учетом влияния числа Вебера и плотности подведенного теплового потока при вторичном распылении для водо-масляных жидких составов для разных методов генерации аэрозоля (удар о стену, удар воздушной струей и микро-взрывной распад при перегреве) [37]. Сравнительный анализ этих методов генерации аэрозоля выявил значительные преимущества схемы микро-взрыва нагретых капель, поскольку размер капель уменьшался в 3–10 раз в зависимости от плотности подводимого теплового потока; минимальная длительность фрагментации достигала 10–20 мс; общая площадь поверхности жидкости увеличивалась в 60–100 раз [37]. В [38] приведены результаты экспериментальных исследований основных процессов тепломассопереноса, происходящих при нагреве, испарении, кипении и последующем взрывном дроблении многокомпонентных капель в потоке нагретого воздуха. Проанализированы эффекты, влияющие на время задержки микро-взрывного распада в зависимости от температуры, концентрации компонентов и размеров многокомпонентных капель, и определены оптимальные условия такой фрагментации. Развитием исследований [38] стали эксперименты [39], в которых приведены результаты анализа интегральных характеристик вторичного распыления капель воды с пузырьками CO_2 и без них

с использованием двух наиболее перспективных схем: столкновения родительских капель друг с другом и их микро-взрывного дробления при интенсивном нагреве. Установлено, что наиболее рациональным является объединение этих двух схем, что обеспечивает кратное увеличение площади поверхности жидкости. В [39] и других известных исследованиях по данной тематике не изучалось наличие твердых примесей в жидкости и неравномерное распределение энергии как факторы интенсификации микро-взрывного дробления.

В большей части исследований по фрагментации капель газонасыщенных жидкостей основное внимание уделяется влиянию на характеристики фрагментации таких факторов как, тепловой поток, параметры окружающей среды и жидких компонентов, степень перегрева и др. Малоизученными остаются процессы развития фрагментации на границе раздела фаз в капле (к примеру, выделение конкретных стадий) при разном насыщении пузырьков и их концентрации, а также идентификация газов и паров в составе капель.

1.1 Цели и задачи исследования

Целью настоящей работы являлось установление по результатам экспериментальных исследований режимов фрагментации капель с разным качеством дисперсной фазы (воды), а также интегральных характеристик процесса, выделение критических условий, при которых газонасыщение капель топлив способствует интенсификации распада. Важно оценить влияние готовых центров парообразования в виде пузырьков газа и твердых частиц на положение пузырей в родительской капле и закономерности трансформации последней перед распадом.

1.2 Экспериментальная методика и материалы

В настоящем исследовании применялись компоненты: дизельное топливо и четыре разновидности воды, отличающиеся концентрацией примесей и газовых пузырьков. Ниже приведена таблица 1 с основными свойствами применяемых жидкостей [42]. Результаты исследований [39–41] обосновали

гипотезу о том, что наличие газовых и твердых примесей в составе двухжидкостных капель приводит к интенсификации процессов распада капель. Однако важно определить диапазоны изменения времени задержки распада капель, количество и размеры формируемых вторичных фрагментов. Такие комплексные исследования возможны при сравнении характеристик распада капель с несколькими типами воды, отличающимися компонентным составом в широких диапазонах.

Таблица 1 – Свойства компонентов, использованных в проведенных экспериментах, в соответствии с данными

Жидкий компонент	Свойства				
	k_l , Вт/(м·К)	C_l , Дж/(кг·К)	ρ_l , кг/м ³	T_b , К	a , м ² /с
Дизельное топливо (н-додекан)	0.137	2215	743.7	489.5	$8.3167 \cdot 10^{-7}$
Вода #1 [дистиллированная]	0.599	4182	998.2	373.15	$1.4349 \cdot 10^{-7}$
Вода #2 [водопроводная]	0.6108	4244.4	1010.7	673	$1.4238 \cdot 10^{-7}$
Вода #3 [концентрация CO ₂ = 0.25 %]	0.6108	4244.5	1008.2	673	$1.4273 \cdot 10^{-7}$
Вода #4 [концентрация CO ₂ = 0.4 %]	0.6108	4244.5	1006.7	673	$1.4295 \cdot 10^{-7}$

Основные свойства (плотность, теплоёмкость, теплопроводность) водяного ядра с учетом объемных долей твердых и газовых компонентов двухжидкостных капель рассчитывались с учетом гипотезы об их аддитивности по формулам:

$$\bar{\rho}_l = \left[\sum_{i=1}^{i=N} (Y_i / \rho_{li}) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где Y_i – массовая доля i -го компонента, ρ_{li} – плотность i -го компонента.

$$\bar{c}_1 = \sum_{i=1}^{i=N} (Y_i \cdot c_{li}), \quad (2)$$

где Y_i – массовая доля i -го компонента, c_{li} – теплоёмкость i -го компонента.

$$\bar{k}_1 = \left[\sum_{i=1}^{i=N} (Y_i \cdot k_{li}^2) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где Y_i – массовая доля i -го компонента, k_{li} – теплопроводность i -го компонента.

Для составов с использованием газонасыщенной воды пересчитывались объёмные доли содержания углекислого газа в массовые с использованием выражений (4)-(6):

$$V_{CO_2} = Y_{(v)CO_2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot R_w^2, \quad (4)$$

$$V_{H_2O} = Y_{(v)H_2O} \cdot \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot R_w^2, \quad (5)$$

$$Y_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{m_{H_2O} + m_{CO_2}} = \frac{\rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}}{\rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + \rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}}, \quad (6)$$

где V_{CO_2} – объём углекислого газа в водяном ядре, V_{H_2O} – объём воды в водяном ядре, $Y_{(v)CO_2}$ – объёмная доля углекислого газа, $Y_{(v)H_2O}$ – объёмная доля воды, R_w – радиус водяного ядра, m_{CO_2} – масса углекислого газа, m_{H_2O} – масса воды, ρ_{CO_2} – плотность углекислого газа, ρ_{H_2O} – плотность воды.

Для составов с использованием водопроводной воды свойства твердых примесей аппроксимировались свойствами каменного угля согласно выражениям (7)–(9). Свойства твердого нерастворимого компонента определялись как функции от температуры:

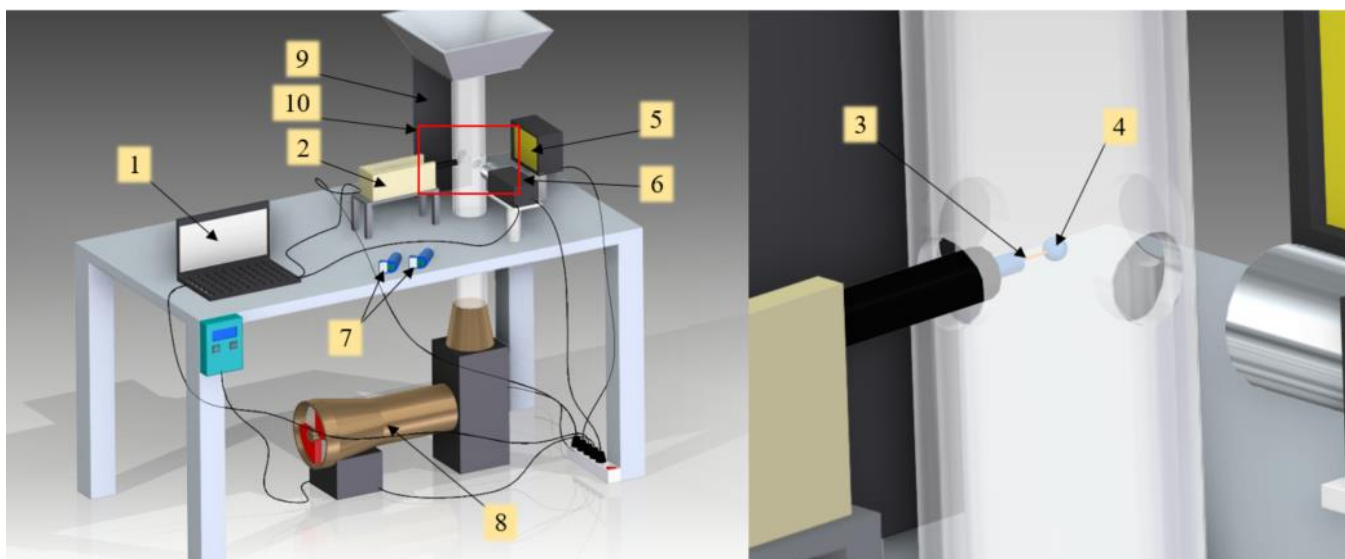
$$\rho_{li} = 0.003 \cdot T_w^2 - 1.4065 \cdot T_w + 1402.9, \quad (7)$$

$$c_{li} = 1154 \cdot T_w^{0.0346}, \quad (8)$$

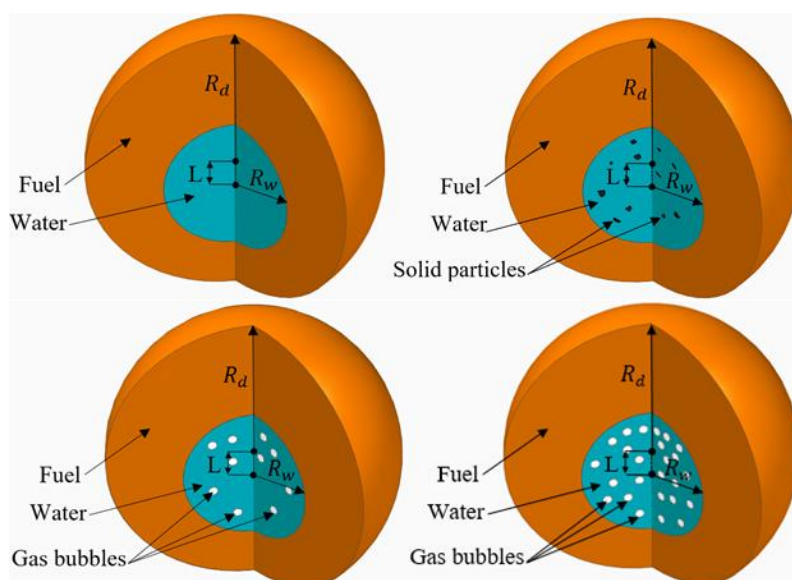
$$k_{li} = 0.0000009 \cdot T_w^2 - 0.0006 \cdot T_w + 0.2707, \quad (9)$$

где ρ_{li} – плотность i -го компонента, c_{li} – теплоёмкость i -го компонента, k_{li} – теплопроводность i -го компонента.

В данном исследовании использовалась схема нагрева исходных родительских капель в потоке разогретого воздуха, представленная на рисунке 1. Температура воздуха (T_a) варьировалась от 350 °С до 450 °С. Нижняя граница диапазона температуры внешней газовой среды соответствует минимальной температуре, при которой реализуется устойчивый распад капли. Верхняя граница соответствует максимально возможной температуре внешней газовой среды на используемом экспериментальном стенде. В [39–41] показано, что при температурах газовой среды от 350 °С до 450 °С реализуется наиболее интенсивная фрагментация капель. Помимо данного температурного диапазона с целью определения границы перехода в режим испарения капель с сохранением их монолитности, т.е. без фрагментации, проводились экспериментальные исследования при меньшей температуре воздуха (менее 300 °С).



a



b

Рисунок 1 – Схема лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований (а) и схематичное изображение капель исследованных жидкостей (b): 1 – Персонализированный компьютер; 2 – координатный механизм; 3 – держатель; 4 – капля; 5 – прожектор; 6 – высокоскоростная камера; 7 – дозатор электронный Finnripette Novus; 8 – воздухонагреватель и нагнетатель вихревого высокого давления; 9 – экран; 10 – область регистрации

Методика генерации капель аналогична использованной в [42]. При помощи двух электронных дозаторов Finnripette Novus (шаг варьирования генерируемого объема 0.1 мкл) проводился забор жидкостей для создания капель «вода/топливо». Родительские капли размещались на держателе, представляющем нихромовую проволоку диаметром 0.2 мм. Изначально создавалась капля воды с и без добавления твердых примесей и газовых пузырьков необходимого объема. Далее формировалась капля топлива.

Для создания высокотемпературной воздушной зоны применялись воздухонагреватель (Leister LHS 61) и нагнетатель вихревого высокого давления (Leister Robust).

Исследуемые родительские капли вводились в область регистрации с помощью координатного механизма, на конце которого находился держатель. Область регистрации подсвечивалась с помощью прожектора (MultiLed QT

projector) для улучшения контраста изображения родительской и дочерней капель. Процессы нагрева, испарения и фрагментации капель регистрировались при помощи высокоскоростной видеокамеры (Phantom Miro M310). Частота съемки при проведении экспериментов составляла 1000 кадров в секунду при разрешении 768x768 пикселей. Полученные по результатам экспериментов видеофрагменты обрабатывались в программном обеспечении Phantom Camera Control. Масштабный коэффициент при обработке составлял 0.018 мм/пикс.

При обработке экспериментальных данных регистрировались характеристики: смещение водяного ядра относительно центра капли, время задержки начала распада капель, время существования капель, критический размер пузыря перед распадом.

Систематическая погрешность определения размеров (начального диаметра капли, смещения водяного ядра) определяется значением масштабного коэффициента (M):

$$\Delta r = \pm M = \pm 0.018 \text{ mm.} \quad (10)$$

Систематическая погрешность определения времени (времени задержки распада, полного времени существования капли) складывалась из погрешности определения момента первого и последующего кадров:

$$\Delta \tau = \pm 2 \cdot \frac{1}{\text{fps}} = \pm 2 \cdot \frac{1}{1000} = \pm 0.002 \text{ s.} \quad (11)$$

Случайные погрешности определялись по формуле (12) с доверительной вероятностью $P = 0.95$ и составили: для времени задержки распада – 1.31 с; для времени существования капли – 1.38 с; для диаметра капли – 0.08 мм; для смещения водяного ядра – 0.054 мм.

$$\Delta(S_i) = \varepsilon \frac{\sigma(i)}{\sqrt{n}}. \quad (12)$$

где $\Delta(S_i)$ – случайная погрешность, ε – коэффициент Стьюдента, $\sigma(i)$ – среднеквадратичное отклонение, n – количество измерений.

Пример регистрации характеристик двухжидкостных капель перед их распадом приведен на рисунке 2. Показаны основные этапы автоматического слежения за границей раздела жидкостей в капле, центрами парообразования в

виде пузырьков и частиц, а также отрывающихся вторичных фрагментов. При этом важно отметить, что разработанный алгоритм вычисления характеристик вторичных капель контролировал условие равенства суммарного объема вторичных капель и родительской с учетом роли процесса испарения при разных температурах внешней газовой среды.

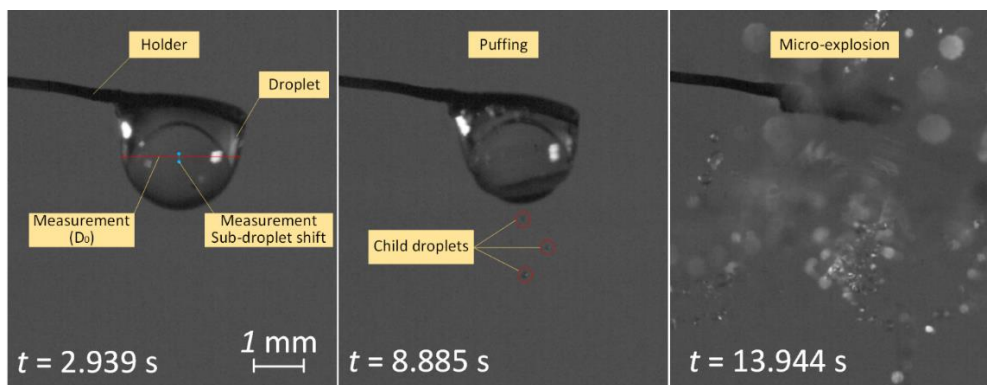
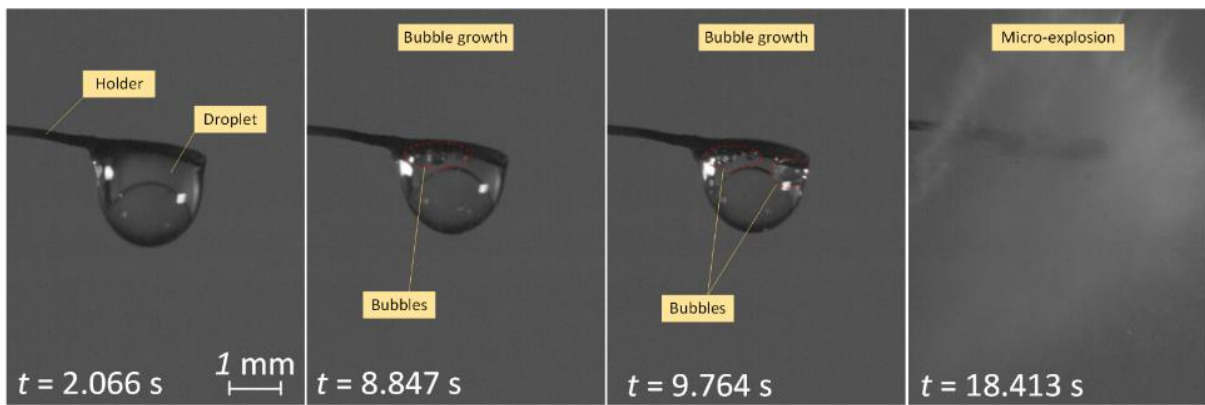


Рисунок 2 – Пример регистрации характеристик двухжидкостных капель перед их распадом и вторичных фрагментов.

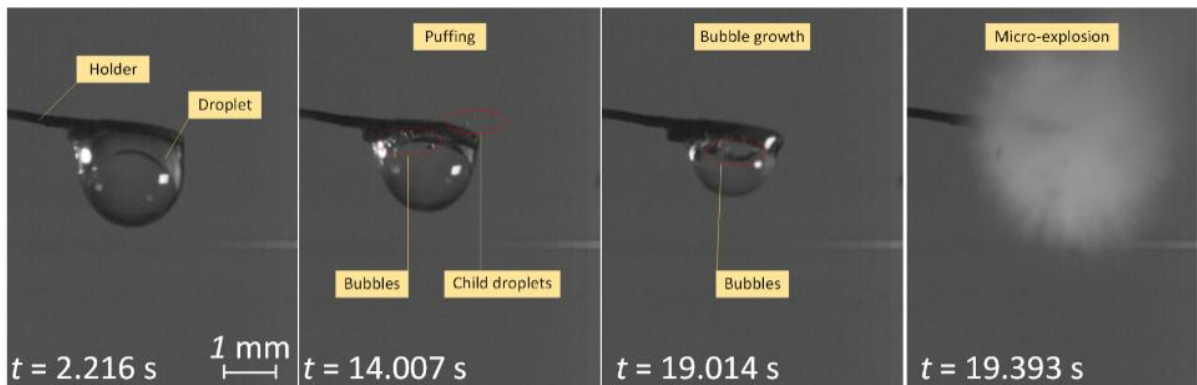
1.3 Результаты

1.3.1 Режимы нагрева, испарения и фрагментации газонасыщенных капель

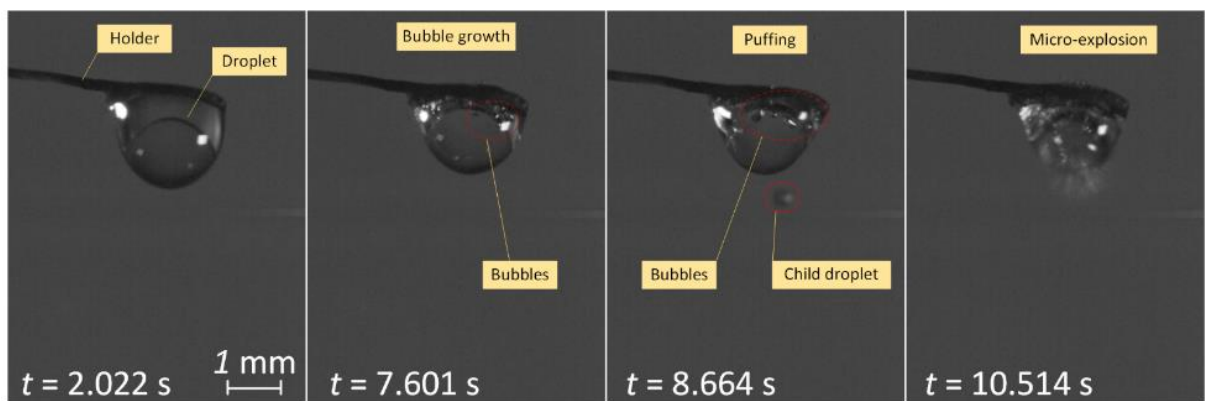
Анализируя кадры проведенных экспериментов можно выделить характерные режимы: прогрев капель без существенной трансформации поверхности (т.е. монотонное уменьшение размера капли вследствие испарения); образование и рост пузырьков внутри капли с медленным уменьшением ее размеров вследствие испарения; отрыв фрагментов жидкости с поверхности капли в виде диспергирования; аккумуляция энергии в капле с последующим динамичным микро-взрывом. Кадры с изображением капель для соответствующих режимов показаны на рисунках 3–6.



a



b

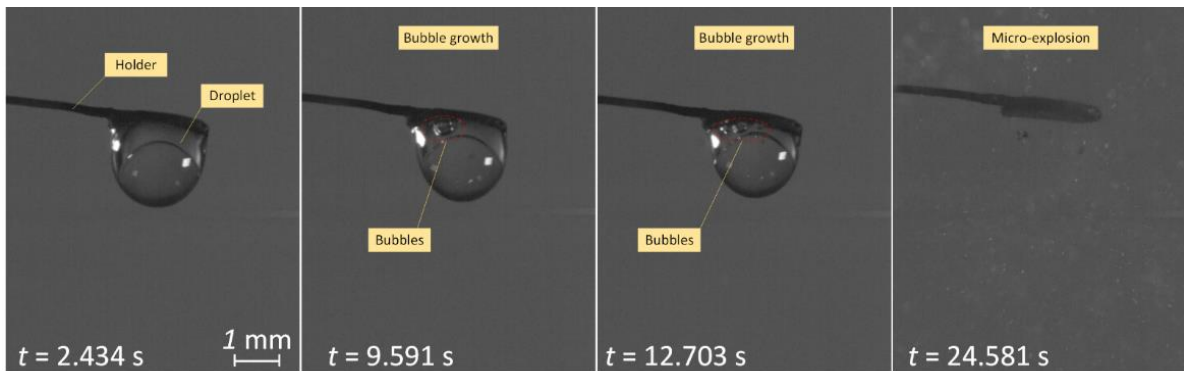


c

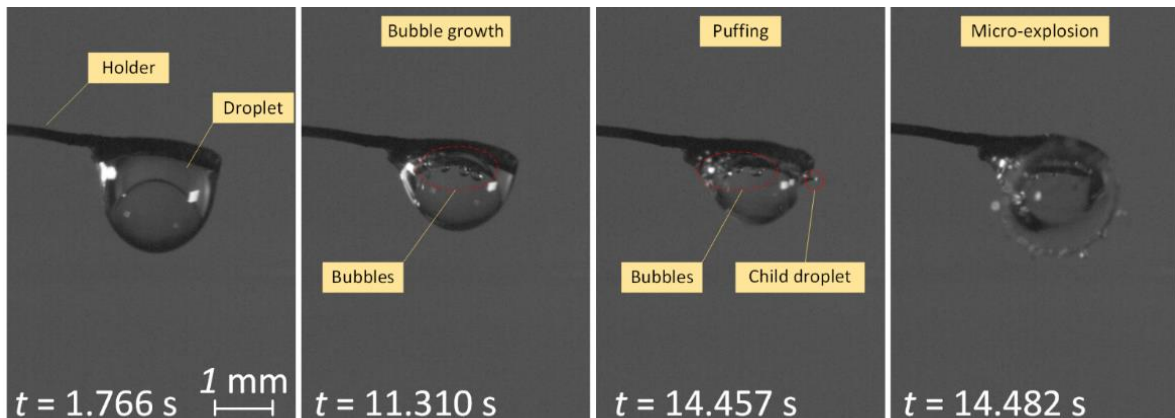
Рисунок 3 – Кадры с изображением каплей состава 1 (дизельное топливо/Вода #1) ($D_0=2.1\pm 0.1$ мм): $T_a\approx 623$ К (*a*), $T_a\approx 673$ К (*b*), $T_a\approx 723$ К (*c*)

При анализе полученных кадров для состава «дизельное топливо/Вода #1» выделены три характерных режима существования капель: зарождение и рост пузырей, диспергирование, микро-взрыв. Интенсификация зарождения и роста пузырей регистрировались после 7 секунды нагрева для капель с начальным

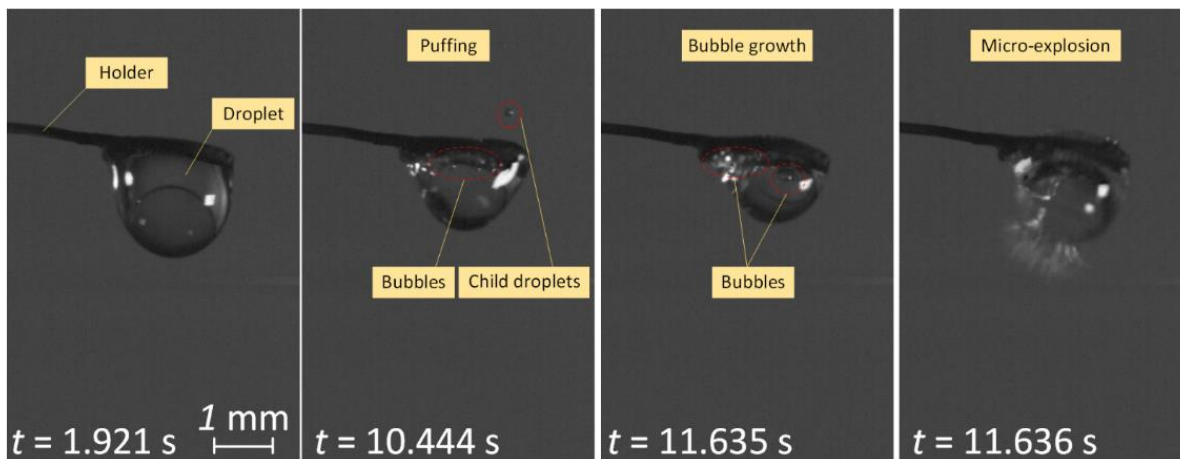
диаметром 2.1 мм. Пузыри в основном образовывались на границе раздела топлива и водяного ядра. Это обусловлено главным образом накоплением неоднородностей в виде газовых пузырей и твердых примесей на этой границе. А также может свидетельствовать о неполной ее смачиваемости вследствие наличия лунок и каверн. Перед микро-взрывным распадом капли регистрировался характерный режим – диспергирование (отрыв отдельных вторичных фрагментов). При повышении температуры внешней газовой среды регистрировалось снижение времени задержки распада и времени полного существования капли.



a



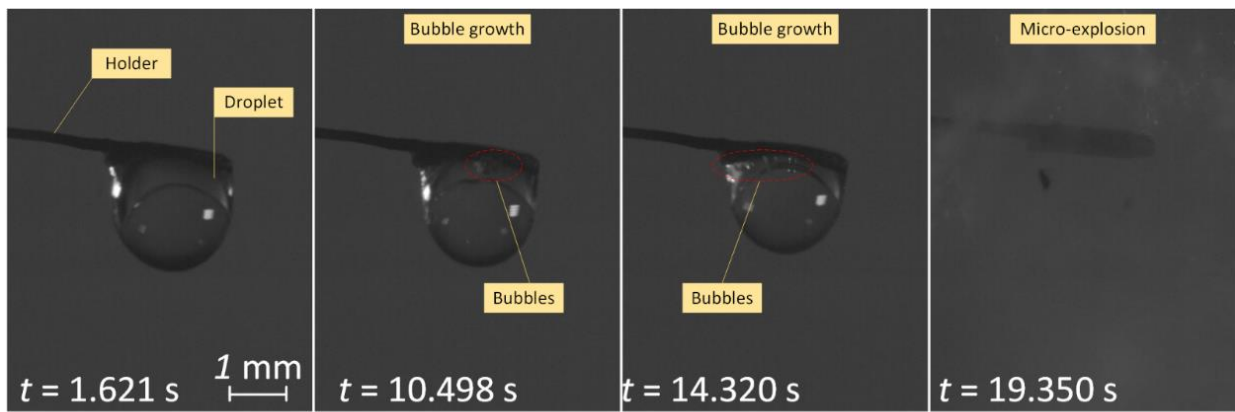
b



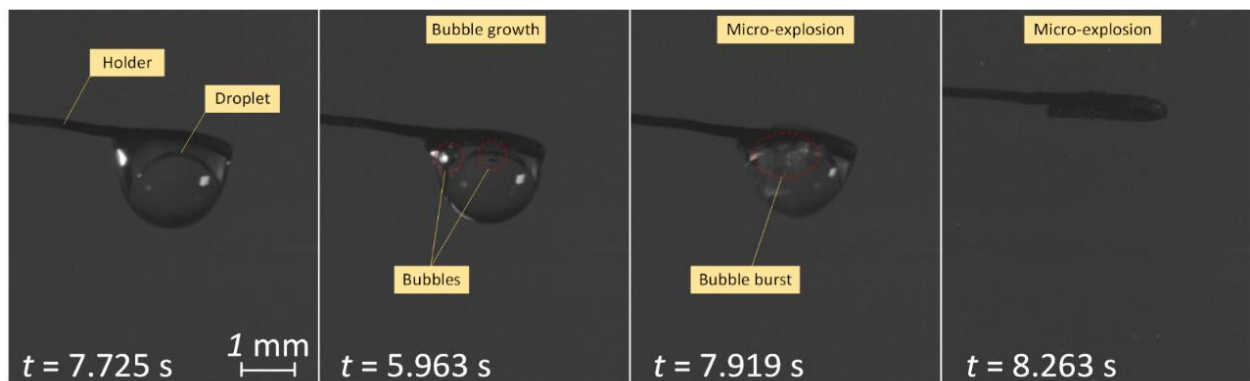
c

Рисунок 4 – Кадры с изображением каплей состава 2 (дизельное топливо/Вода #4) ($D_0=2.1\pm 0.1$ mm): $T_a\approx 623$ К (a), $T_a\approx 673$ К (b), $T_a\approx 723$ К (c)

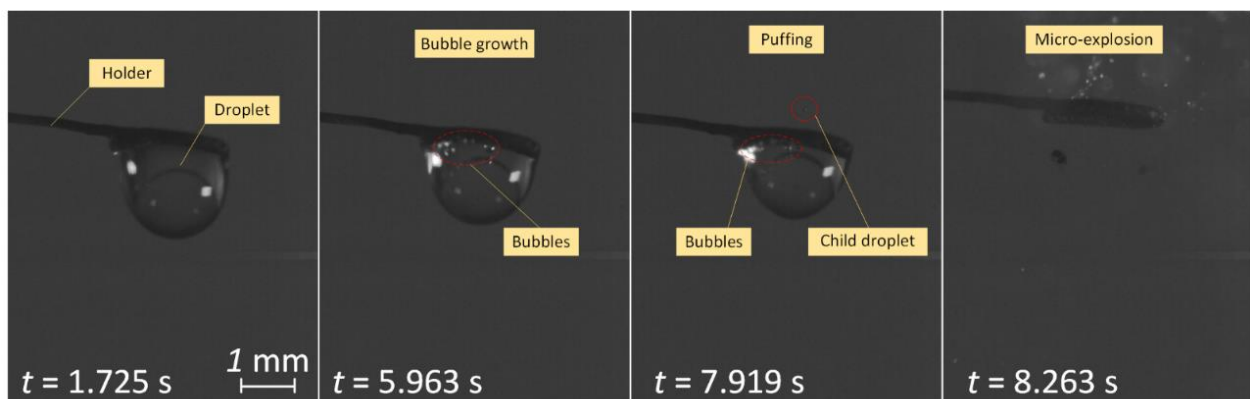
В опытах с составом «дизельное топливо/Вода #4» установлено, что зарождение пузырей проходит не только на границе раздела топливо/вода, но и непосредственно во всем объеме водяного ядра. Довольно хорошо показано влияние пузырьков газов и твердых частиц на длительность существования каплей, режим их фрагментации, временную задержку распада, количество и размеры вторичных фрагментов. Рост количества готовых центров парообразования приводит к снижению степени перегрева вода, соответственно снижению времени задержки распада и уменьшению количества вторичных фрагментов. Это обусловлено уменьшением доли тепловой энергии, запасённой внутри водяного ядра до распада, с ростом количества готовых центров парообразования.



a



b

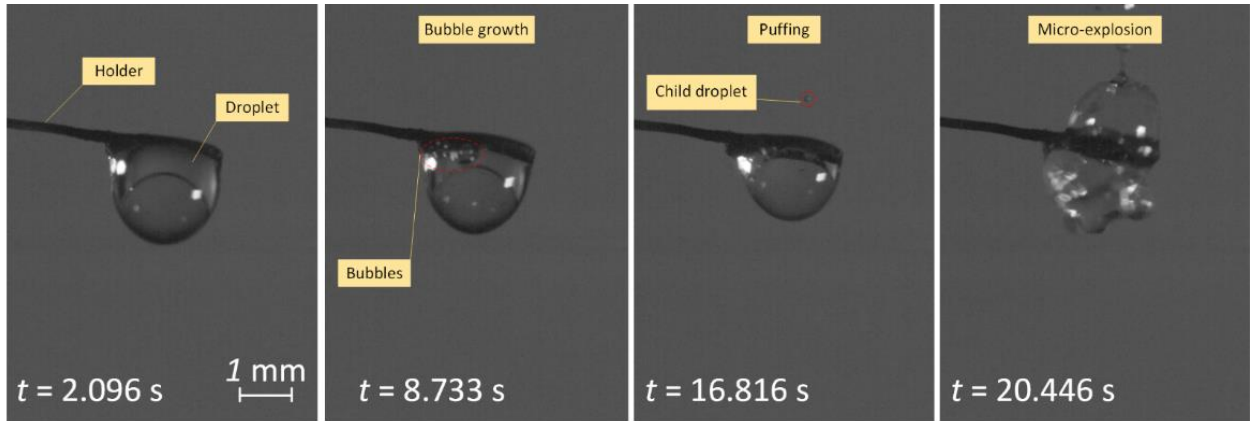


c

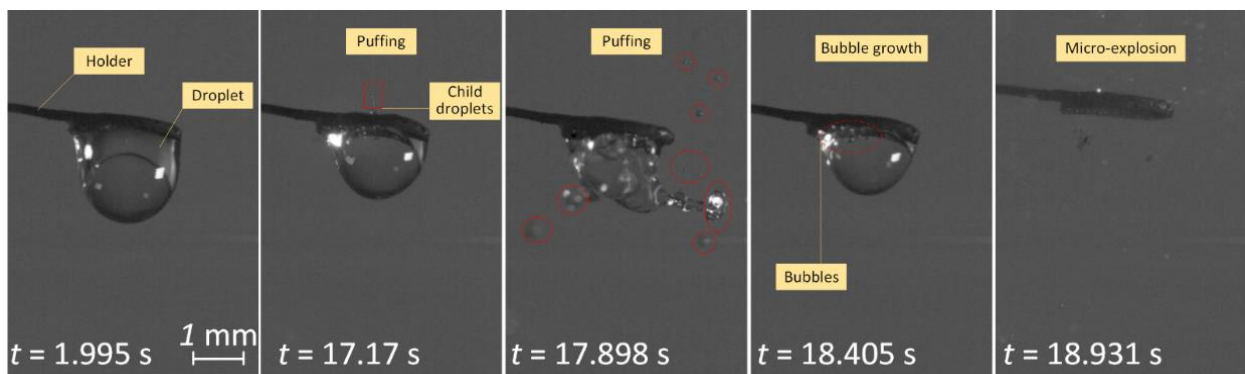
Рисунок 5 – Кадры с изображением каплей состава 3 (дизельное топливо/Вода #3) ($D_0=2.1\pm 0.1$ mm): $T_a\approx 623$ К (a), $T_a\approx 673$ К (b), $T_a\approx 723$ К (c)

Для состава «дизельное топливо/Вода #3» характерно зарождение и рост пузырей на границе раздела вода/топливо. Но кадры видеороликов показали, что пузырьки меньшего размера присутствовали в объеме водяного ядра в сравнении с каплями состава «дизельное топливо/Вода #4». Данный результат

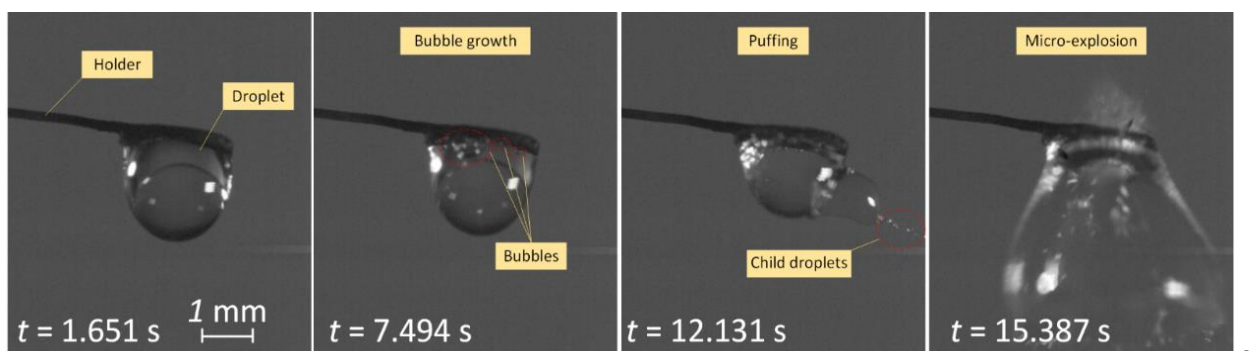
подтверждается тем, что при увеличении концентрации газовых пузырьков интенсифицируются процессы их коагуляции с образованием более крупных пузырей.



a



b



c

Рисунок 6 – Кадры с изображением каплей состава 4 (дизельное топливо/Вода #2) ($D_0=2.1\pm 0.1$ mm): $T_a\approx 623$ К (a), $T_a\approx 673$ К (b), $T_a\approx 723$ К (c)

При анализе экспериментальных данных для состава «дизельное топливо/Вода #2» можно отметить, что зарождение пузырей, как правило,

происходит на границе раздела вода/топливо и на границе с держателем. Здесь стоит отметить, что пузыри, образующиеся на границе с держателем, не приводят к распаду капли, а вот пузыри на границе раздела жидкость/жидкость приводят к интенсивному дроблению. Также характерным для данного состава является образование значительного числа крупных вторичных фрагментов (размерами – радиусами 20–80 мкм) в сравнении с другими. Наличие готовых центров парообразования оставляет свой отпечаток на снижении температурного перегрева и соответственно доли накопленной тепловой энергии. В этом случае в зависимости от решаемой задачи следует формулировать требования по водоподготовке при использовании в реальных практических приложениях.

Наиболее существенное влияние на условия и характеристики фрагментации капель оказывает тепловой фактор – температура внешней газовой среды. Установлено, что для эффективной микро-взрывной фрагментации необходимо выдержать определенный температурный интервал. Для изученных составов он составил от 400 °С до 450 °С. При невысоких температурах (менее 300 °С) подводимая теплота недостаточна для интенсификации роста паровых пузырей. Поэтому чаще всего капли при небольшой трансформации поверхности испарялись. При повышении температуры газовой среды до 350 °С регистрировались условия отрыва вторичных фрагментов с поверхности родительской капли. Времена задержки начала отрыва таких фрагментов были достаточно малыми, но длительность существования в целом капли была большой (как правило, не менее 10 с). Это обусловлено тем, что при таких температурах успевали перегреться до состояния кипения лишь локальные объемы жидкости вблизи поверхности капли, которые и фрагментировали. При повышении температуры внешней газовой среды до 350 °С подводимой теплоты достаточно для перегрева границы раздела жидкостей в большем объеме. Это способствовало определенному аккумулярованию энергии в глубинных слоях капли, последующему заполнению паром всего объема последней и распаду в режиме микро-взрыва.

Однако такие условия регистрировались в лимитированном температурном диапазоне – от 400 °С до 450 °С. Это обусловлено тем, что при слишком высоких температурах скорости прогрева и испарения горючего жидкого компонента настолько высокие, что пленка очень быстро испаряется и пузырьки воздуха и пара не успевают наполнить объем капли. Ее размеры интенсивно уменьшаются при редких отрывах небольших фрагментов с поверхности. Роль готовых центров парообразования в виде пузырьков и твердых частиц значительная, но тепловой фактор все же является определяющим, так как в указанных температурных интервалах стабильно реализовывались указанные режимы существования капель с различным количеством готовых центров парообразования.

Определенное чередование режимов существования родительской капли в процессе нагрева обусловлено протеканием совокупности взаимосвязанных физико-химических процессов и фазовых превращений. Так, например, наиболее общий механизм трансформации родительской капли в процессе прогрева включал следующие этапы. Изменение температуры внешней газовой среды, размеров капли, типа и концентрации примесей в ней приводило к смене времени задержки распада и последствий вторичного измельчения капель, но общие тенденции сохранялись. В частности, на первом этапе интенсифицировался прогрев капли. Вследствие наличия воды, имеющей высокие значения теплоты парообразования и теплоемкость, начальный этап прогрева родительских капель можно считать инертным. Затем интенсифицировалось испарение жидкого горючего компонента, так как замедлялся сток подводимого тепла в глубинные слои к воде. Жидкий горючий компонент имел в несколько раз меньшую теплоемкость и более высокую теплопроводность. Ранее перечисленные характеристики в сочетании с высоким значением температуры кипения является причиной перегрева горючей жидкости до температур, превышающих температуру кипения воды. Благодаря этому на границе раздела воды с горючей жидкостью обеспечивались условия зарождения и роста пузырьков пара, которые со временем объединялись и далее

формировался основной пузырь, давление паров в котором возрастало и приводило к превышению давления сдерживающих поверхностных сил. Пленка горючей жидкости вокруг пузыря утончалась вследствие его роста и интенсивного испарения. При превышении некоторого критического размера пузыря (как правило, от двух до трех характерных размеров капель) регистрировалась фрагментация. Наличие готовых центров парообразования в виде пузырьков газа приводило к замедлению прогрева воды в целом вследствие меньшей суммарной теплопроводности (для паров и газов этот показатель на порядок ниже, чем жидкостей). Присутствие же твердых частиц в качестве центров парообразования, наоборот, приводило к ускорению прогрева водяного ядра вследствие их повышенной теплопроводности по сравнению с жидкостью. Вследствие конвективных течений в каплях и действия гравитационных сил регистрировались условия агломерации твердых частиц и пузырьков газов в каплях. Действие этих эффектов можно было прогнозировать достоверно при рассмотрении объединенной твердой частицы или пузыря в качестве единого агломерата. Чем больше размеры таких агломератов, тем существеннее отличия характеристик фрагментации. При высоких температурах внешней газовой среды перемещения готовых центров парообразования в объеме капли было настолько существенным, что частицы и пузырьки агломерировались достаточно редко. Лишь после испарения определенного объема жидкости стабильно регистрировались эффекты агломерации частиц и пузырьков, приводящих к распаду капель.

Целесообразно отметить интересные закономерности формирования вторичных фрагментов при распаде родительских капель. Они состояли в разном количестве, размерах, компонентном составе и условиях дальнейшего прогрева. Так, например, проведенные эксперименты позволили зарегистрировать эффекты каскадной фрагментации родительских и дочерних капель с имеющимися в составе пузырьками пара, воздуха и твердыми частицами. Эти эффекты обусловлены тем, что имеющиеся в составе родительской капли пузырьки и твердые частицы уносились с ее поверхности вместе с вторичными

каплями. Так как объем жидкости во вторичных фрагментах был на порядок меньше, чем в родительской, то фрагментация интенсифицировалась каскадно после формирования. В тоже время достаточно контрастно регистрировалась разница между характеристиками фрагментации вторичных капель с разным содержанием твердых частиц и пузырьков. Чем меньше было таких включений в исходных каплях, тем дольше был их прогрев, но режим фрагментации в большинстве случаев соответствовал микро-взрыву. Эти закономерности в дальнейшем позволили воспроизводить по характеристикам фрагментации вторичных фрагментов их компонентный состав.

Также важно отметить отличия трансформации поверхности исходных капель в целом при наличии и без готовых центров парообразования. Чем меньше таких готовых центров в капле, тем более сферичной она представлялась. Твердые частицы в составе капли с течением времени циркуляции вследствие разности давлений и сил агломерировали. Капля вытягивалась в направлении формирования такого агломерата. Чаще всего такие капли представляли вытянутые эллипсоиды в направлении натекающего потока воздуха. Далее капли закручивались и в виде гантелей и цилиндрических дисков регистрировались в потоке. Наличие газовых пузырьков в капле приводило к трансформации ее поверхности в несколько хаотичном режиме. Она представляла неправильный многогранник со сглаженными гранями. За счет внешних действующих сил в потоке разогретой газовой среды усиливалась трансформация. Так как центры парообразования часто смещены от центра к периферии, то наиболее часто регистрировалась фрагментация капель со смещенным в какую-либо сторону основным паровым пузырем относительно центра.

Достаточно важную роль играют эффекты взаимодействия пузырьков газа и паров воды в каплях при нагреве. Определяющее значение имели тепловые условия. Чем выше температура внешней газовой среды, тем интенсивнее протекали указанные взаимодействия пузырьков. На кадрах регистрировались эффекты коагуляции пузырьков с образованием больших агломератов,

приводящих к более быстрому распаду, но с меньшим количеством вторичных фрагментов. Этот результат является интересным с точки зрения решения конкретных практических задач, посвященных в одном случае интенсификации фрагментации с минимальным временем задержки, а в другом – к росту площади аэрозольного облака в результате формирования мелких вторичных фрагментов. Управление количеством готовых центров парообразования позволяет получать конкретные результаты по характеристикам и режимам фрагментации.

1.3.2 Временные характеристики фрагментации

На рисунке 7 представлены установленные зависимости времени существования капли (τ_h) от температуры воздуха (T_a). Цифрами на рисунке обозначены серии экспериментов с различными составами: дизельное топливо/Вода #1 ($D_0=2.0\pm 0.1$ мм); дизельное топливо/Вода #4 ($D_0=2.0\pm 0.1$ мм); дизельное топливо/Вода #3 ($D_0=2.0\pm 0.1$ мм); дизельное топливо/Вода #2 ($D_0=2.0\pm 0.1$ мм).

Получены аппроксимационные выражения для кривых (1)–(4) на рисунке 7: $\tau_h(T_a) = 169.84 \cdot e^{-0.008T_a}$; $\tau_h(T_a) = 155.08 \cdot e^{-0.006T_a}$; $\tau_h(T_a) = 89.814 \cdot e^{-0.005T_a}$; $\tau_h(T_a) = 226.20 \cdot e^{-0.008T_a}$. Установлено, что наибольшее время существования каплей соответствует составу (дизельное топливо/Вода #4) во всем диапазоне температур газа (от 350 °С до 450 °С). Это связано с высокой массовой долей CO_2 в данном составе, что приводит к снижению эффективных значений температуропроводности водяного ядра. Аналогичные эффекты зарегистрированы и для состава с меньшей долей CO_2 (дизельное топливо/Вода #3). Минимальные времена существования каплей соответствовали составам дизельное топливо/Вода #1, что связано с отсутствием локальных перегревов на готовых центрах парообразования в виде твердых примесей и газовых пузырьков. Это приводило к более равномерному прогреву водяного ядра до условий полного распада с образованием мелких вторичных фрагментов (размерами (радиусами) менее 10 мкм). Присутствие любого количества пузырьков в составе родительской капли не только уменьшало суммарную

температуропроводность и замедляло ее прогрев, но и приводило в целом к изменению условий теплообмена между жидкостями (вода и дизельное топливо) в объеме. Это обусловлено тем, что существенно трансформировалась граница раздела жидкостей в капле. Поэтому времена задержки распада капель существенно отличались от условий, при которых пузырьки воздуха и частицы присутствовали в капле.

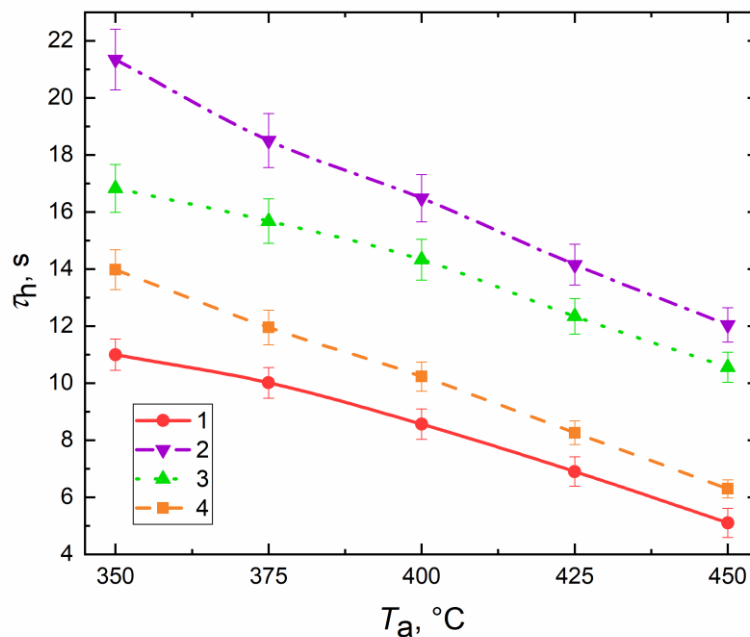


Рисунок 7 – Зависимости полного времени существования родительской капли (τ_p) от температуры внешней газовой среды (T_a) для различных составов: 1 – дизельное топливо/Вода #1, 2 – дизельное топливо/Вода #4, 3 – дизельное топливо/Вода #3, 4 – дизельное топливо/Вода #2

На рисунке 8 представлены зависимости времени задержки распада капли (τ_p) от температуры внешней газовой среды (T_a). Температура T_a варьировалась, как и ранее, в диапазоне от 350 °С до 450 °С. Обозначения серий экспериментов идентично рисунку 7. Наибольшее время задержки распада наблюдается для состава дизельное топливо/Вода #1. Это связано, главным образом, с отсутствием готовых низкотемпературных центров парообразования в виде твердых примесей и газовых пузырьков.

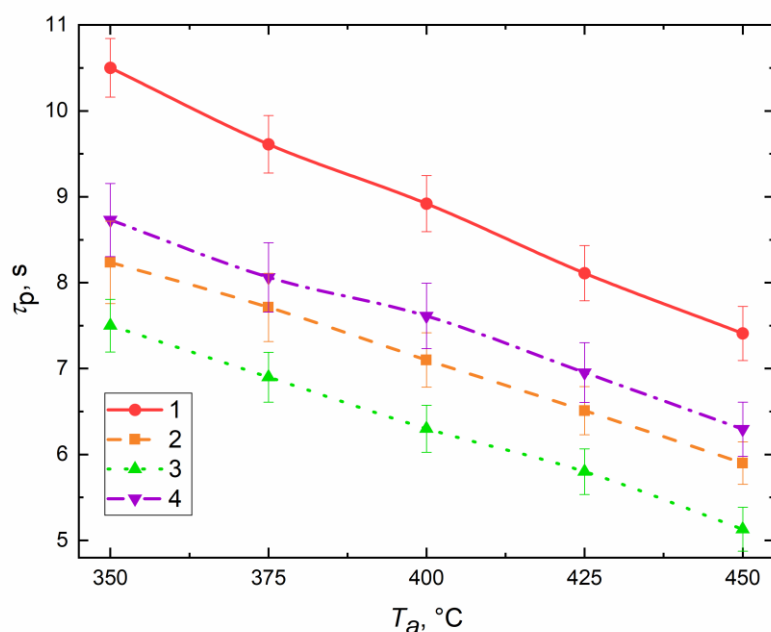


Рисунок 8 – Зависимости времени задержки распада капли (τ_p) от температуры внешней газовой среды (T_a) для различных составов: 1 – дизельное топливо/Вода #1, 2 – дизельное топливо/Вода #4, 3 – дизельное топливо/Вода #3, 4 – дизельное топливо/Вода #2

Получены аппроксимационные выражения для кривых (1)–(4) на рисунке 8: $\tau_p(T_a) = 35.394 \cdot e^{-0.003T_a}$; $\tau_p(T_a) = 26.852 \cdot e^{-0.003T_a}$; $\tau_p(T_a) = 27.916 \cdot e^{-0.004T_a}$; $\tau_p(T_a) = 26.992 \cdot e^{-0.003T_a}$. При генерации двухжидкостных капель водяное ядро смещалось вниз под действием силы тяжести относительно центра капли. Это приводит к локальному снижению толщины топливной оболочки и ускорению процессов распада капли. В таблице 2 представлены диапазоны смещения водяного ядра относительно центра капли для разных составов и условий нагрева. Обозначение составов капель идентично рисунку 7. Значения смещения водяного ядра находились в диапазоне от 0.07767 мм до 0.297674 мм во всем массиве экспериментальных данных. При этом максимальные смещения зарегистрированы для составов дизельное топливо/Вода #1, а минимальные – для состава дизельное топливо/Вода #2. Данные результаты свидетельствуют о важности учета смещения водяного ядра при оценке времени задержки распада и формулировании рекомендаций для практических приложений.

Таблица 2 – Диапазоны смещения водяного ядра относительно центра капли для разных составов и условий нагрева

Состав	$T_a, ^\circ\text{C}$	Мин. смещение, mm	Макс. смещение, mm
дизельное топливо/Вода #1	350	0.1133 ($\tau_p=12.092$ s)	0.297674 ($\tau_p= 10.484$ s)
	400	0.13871 ($\tau_p= 9.603$ s)	0.195238 ($\tau_p= 8.893$ s)
	450	0.150235 ($\tau_p= 6.048$ s)	0.256158 ($\tau_p= 5.63$ s)
дизельное топливо/Вода #2	350	0.105263 ($\tau_p= 6.886$ s)	0.181818 ($\tau_p= 5.518$ s)
	400	0.126126 ($\tau_p= 5.94$ s)	0.210526 ($\tau_p= 5.916$ s)
	450	0.162162 ($\tau_p= 5.739$ s)	0.220377 ($\tau_p= 5.471$ s)
дизельное топливо/Вода #3	350	0.07767 ($\tau_p= 7.532$ s)	0.210526 ($\tau_p= 7.265$ s)
	400	0.121495 ($\tau_p= 5.931$ s)	0.212389 ($\tau_p= 5.889$ s)
	450	0.143139 ($\tau_p= 4.529$ s)	0.214953 ($\tau_p= 4.452$ s)
дизельное топливо/Вода #4	350	0.178241 ($\tau_p= 9.587$ s)	0.238318 ($\tau_p= 9.838$ s)
	400	0.124352 ($\tau_p= 10.303$ s)	0.201878 ($\tau_p= 10.037$ s)
	450	0.104695 ($\tau_p= 6.602$ s)	0.258537 ($\tau_p= 6.458$ s)

1.3.3 Критические размеры пузырей перед распадом

При проведении экспериментальных исследований регистрировались критические размеры (диаметры) образующейся группы пузырей непосредственно перед распадом (D_{bubble}). На рисунке 9 представлены зависимости отношения критического диаметра пузыря перед микро-взрывом капли (D_{bubble}) к начальному диаметру капли (D_0) и температуры внешней газовой среды (T_a).

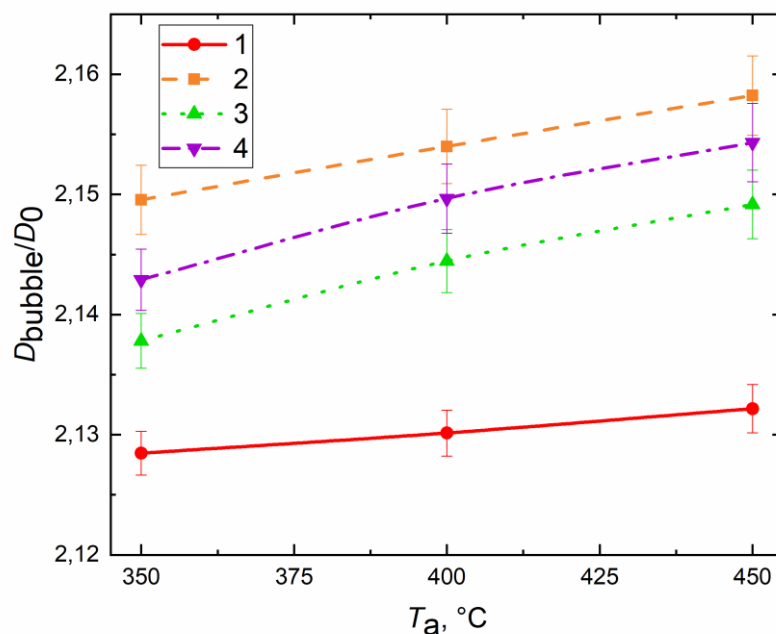


Рисунок 9 – Зависимости отношения критического диаметра пузыря перед микро-взрывом капли (D_{bubble}) к начальному диаметру капли (D_0) от температуры внешней газовой среды (T_a) для различных составов: 1 – дизельное топливо/Вода #1, 2 – дизельное топливо/Вода #4, 3 – дизельное топливо/Вода #3, 4 – дизельное топливо/Вода #2

Получены аппроксимационные выражения для кривых (1)–(4) на рисунке 9: $\frac{D_{bubble}}{D_0}(T_a) = 2.1155 \cdot e^{0.001T_a}$; $\frac{D_{bubble}}{D_0}(T_a) = 2.1195 \cdot e^{0.0014T_a}$; $\frac{D_{bubble}}{D_0}(T_a) = 2.0989 \cdot e^{0.0022T_a}$; $\frac{D_{bubble}}{D_0}(T_a) = 2.1039 \cdot e^{0.002T_a}$. Важным результатом в данной части является получение критического размера (радиуса) пузыря для составов с разным качеством воды. Максимальный размер пузыря наблюдался для составов с дистиллированной водой, что связано с минимальным количеством центров парообразования и соответственно максимальным перегревом воды. Перегрев воды определяет скорость роста паровой фазы и соответственно его критический размер. При этом наблюдается слабая зависимость отношения критического диаметра пузыря к начальному диаметру капли от температуры для всех составов. Это позволяет сделать вывод о наличии вполне определённого значения отношения критического пузыря к начальному диаметру капли для составов с разным качеством воды, который связан со значением достижимого

перегрева в таких составах. Диапазон соответствующих значений в проведенных экспериментах составлял от 2.12-2.16. Кроме того, следует отметить, что в диапазоне температур газа 350-450 °С скорости нагрева двухжидкостных капель в проведенных экспериментах составляли от 100 К/с до 300 К/с. Согласно ранним результатам [43,44] в этом диапазоне скоростей нагрева степень перегрева изменяется от 10 К до 15 К. Что касается практического использования результатов, представленных на рисунке 9, то здесь важно принимать во внимание особенности решаемой задачи (фундаментальная, либо инженерная) и важность учета слабой зависимости критического размера пузыря от температуры газа и более сильной зависимости от количества готовых центров парообразования.

1.3.4. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

На рисунках 10–11 представлено сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных значений времени до диспергирования/микро-взрыва для изолированной капли в широком диапазоне варьирования температуры нагрева. Теоретические значения соответствующих времен получены с использованием модели [39]. Данные оценки позволили определить диапазоны температур газовой среды, необходимых для стабильной реализации процессов диспергирования/микро-взрыва в типичных камерах сгорания дизельных двигателей и котельных агрегатов. На рисунке 10 представлены экспериментальные и теоретические зависимости времени задержки распада от температуры внешней газовой среды для состава (дизельное топливо/Вода #1) (a) и для состава (дизельное топливо/Вода #4) (b). Получено удовлетворительное согласие эксперимента и теории при учете скорости потока при моделировании (кривые 1 и 3). Аналогичные эффекты зарегистрированы для зависимостей, представленных на рисунке 11 для состава (дизельное топливо/Вода #3) (a) и для состава (дизельное топливо/Вода #2) (b). Однако следует отметить, что с увеличением температуры внешней газовой среды разница между теорией и экспериментом увеличивается. Это связано с тем, что при моделировании не учитываются эффекты смещения водяного ядра

относительно центра и его перемещение внутри двухжидкостной капли в процессе нагрева под действием внутренних конвективных течений. Все эти эффекты приводят к меньшим значениям времени задержки распада в эксперименте. С точки зрения прогнозирования времени задержки распада для практических приложений, то здесь важно принимать максимально возможные значения времен задержек распада, чтобы при любом исходе положения водяного ядра в конечном объеме камеры сгорания инициировался микро-взрыв капле.

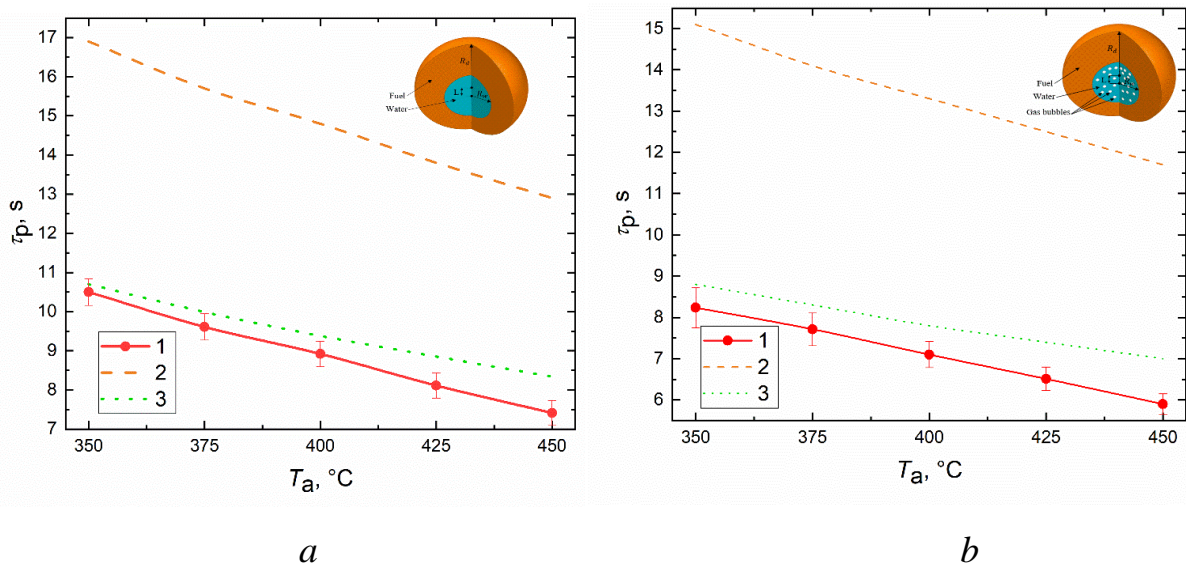


Рисунок 10 – Зависимости времени задержки распада капли (τ_p) от температуры внешней газовой среды (T_a) для состава (дизельное топливо/Вода #1) (*a*) и для состава (дизельное топливо/Вода #4) (*b*): 1 – экспериментальные данные, 2 – результаты моделирования без учета скорости газового потока, 3 – результаты моделирования с учетом скорости газового потока

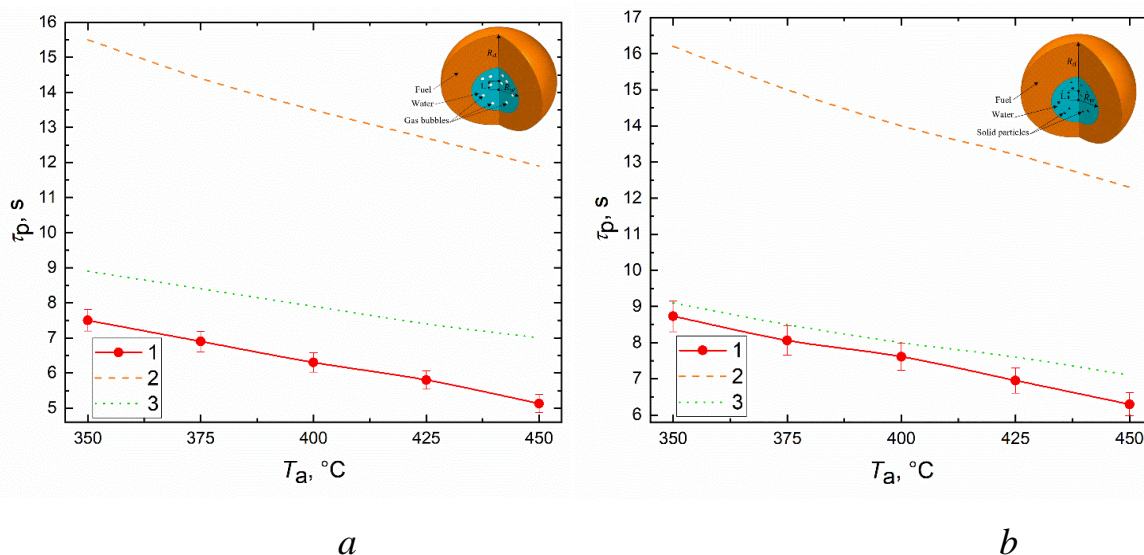


Рисунок 11 – Зависимости времени задержки распада капли (τ_p) от температуры внешней газовой среды (T_a) для состава (дизельное топливо/Вода #3) (a) и для состава (дизельное топливо/Вода #2) (b): 1 – экспериментальные данные, 2 – результаты моделирования без учета скорости газового потока, 3 – результаты моделирования с учетом скорости газового потока

На рисунке 12 приведены результаты математического моделирования в виде зависимостей времени задержки распада в широком диапазоне температур газа от 227 °С (500 К) до 927 °С (1200 К) для различных составов: 1 – дизельное топливо/Вода #1, 2 – дизельное топливо/Вода #4, 3 – дизельное топливо/Вода #3, 4 – дизельное топливо/Вода #2. Наибольшая разница между временами задержки распада для составов 1–4 зарегистрирована при температурах менее 327 °С, что связано с существенным влиянием значений температуропроводности водяного ядра и топливной оболочки при этих температурах. С увеличением температуры газа выше 327 °С разница между значениями времени задержки распада для различных составов становится менее 5%. Это позволяет сделать вывод, что эффекты изменения эффективных свойств водяного ядра при добавления твердых примесей и газовых пузырьков пренебрежимо малы и могут не учитываться при температурах газа выше 327 °С, если допустимо отклонение между результатами вычислений для разных составов до 5%, что часто приемлемо для многих практических приложений. Данные, представленные на рисунке 12,

могут быть использованы в различных практических приложениях, исходя из рассматриваемого диапазона температуры внешней газовой среды, например: пожаротушение (727–927 °С), дизельные двигатели (227–427 °С), авиационные двигатели (227–527 °С), котельные агрегаты (527–727 °С), термическая очистка воды от нергламентированных примесей (727–927 °С).

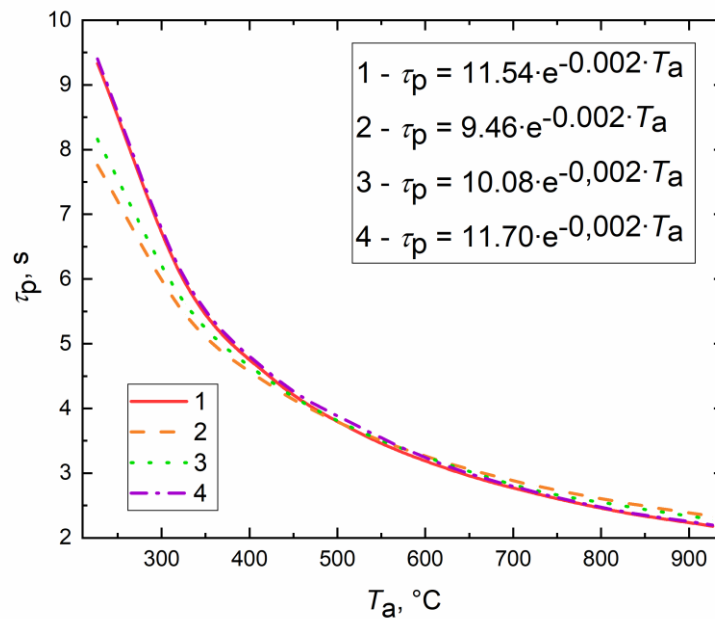


Рисунок 12 – Теоретические зависимости времени задержки распада капли (τ_p) от температуры T_a для различных составов: 1 – дизельное топливо/Вода #1, 2 – дизельное топливо/Вода #4, 3 – дизельное топливо/Вода #3, 4 – дизельное топливо/Вода #2

На рисунке 13 приведены результаты математического моделирования в виде зависимостей времени задержки распада в широком диапазоне изменения начального радиуса капли (от 50 мкм до 1 мм) для различных составов: 1 – дизельное топливо/Вода #1, 2 – дизельное топливо/Вода #4, 3 – дизельное топливо/Вода #3, 4 – дизельное топливо/Вода #2. Аналогично результатам, представленным на рисунке 12, установлены диапазоны начальных размеров капель, при которых эффектами, связанными с изменением свойств водяного ядра при добавлении примесей можно пренебречь. В частности, установлено, что в диапазоне размеров от 50 мкм до 200 мкм добавление твердых примесей и

газовых пузырьков не оказывает существенно влияние на время задержки распада (разница между задержками распада для разных составов менее 5 %). Полученные результаты (рисунок 12 и рисунок 13) доказывают, что при больших скоростях нагрева капля (в основном более 10^6 К/с) (соответственно высоких температурах газа и малых размерах каплей) пропадает необходимость к формулированию требований к качеству воды для достижения предельных перегревов воды в составе двухжидкостных капель.

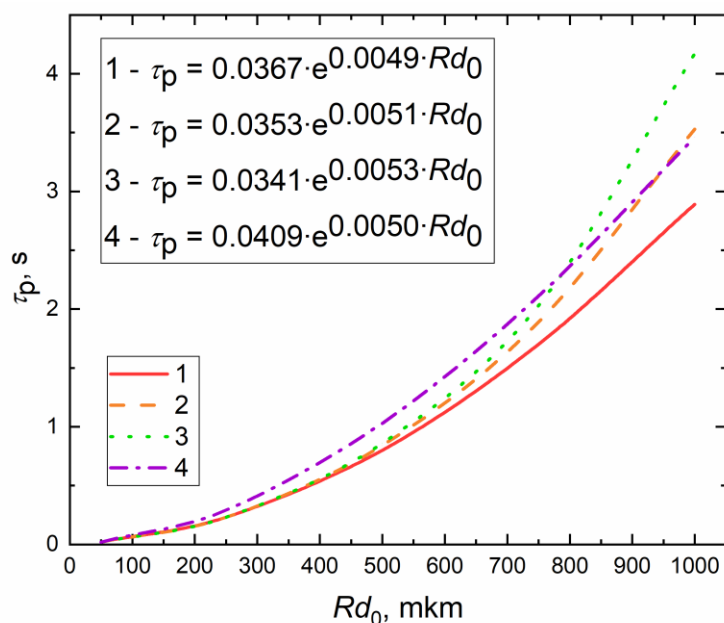


Рисунок 13 – Теоретические зависимости времени задержки распада капли (τ_p) от начального радиуса капли (Rd_0) для различных составов: 1 – дизельное топливо/Вода #1, 2 – дизельное топливо/Вода #4, 3 – дизельное топливо/Вода #3, 4 – дизельное топливо/Вода #2

1.4 Выводы по разделу

1. Установлены характерные режимы существования при нагреве двухжидкостных капель: образование и рост пузырьков внутри капли, диспергирование, микро-взрыв. Образование и рост пузырьков внутри капли для состава с использованием дистиллированной воды происходит на границе раздела топлива и водяного ядра, для состава с использованием сильногазированной воды на границе раздела топлива и водяного ядра, а также

во всем объеме водяного ядра, для состава с использованием слабогазированной воды, а также водопроводной воды образование и рост пузырьков происходит идентично составу с использованием сильногазированной воды, но размеры пузырьков значительно меньше. При полном распаде двухжидкостных капель образовывались мелкие вторичных фрагментов, размер которых при использовании состава с водопроводной водой больше в 2–8 раз, чем для других составах. Для всех составов можно отметить снижение времени задержки распада и времени существования капель с увеличением температуры внешней газовой среды.

2. Получены зависимости времени существования капли, времени задержки распада капли от температуры внешней газовой среды в диапазоне от 350 °С до 450 °С. Наибольшее время существования имеют капли дизельное топливо/Вода #4, минимальное время существования зарегистрировано для состава дизельное топливо/Вода #1. Наибольшее время задержки зарегистрировано для состава с дистиллированной водой, наименьшее – для состава с использованием слабогазированной воды. Установлены зависимости времени задержки распада капли от величины смещения водяного ядра относительно центра капли, а также диапазоны смещения водяного ядра относительно центра капли для разных составов и условий нагрева в эксперименте.

3. Выделены перспективные механизмы управления характеристиками распада капель за счет размещения в них готовых центров парообразования различного происхождения и выдержки определенного температурного режима. Полученные результаты создают объективные предпосылки для развития технологий зажигания облака капель жидких топлив, технологий термической и огневой очистки жидкостей от загрязняющих их нерегламентированных примесей, а также пожаротушения.

2 Проектирование АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества

2.1 Анализ объекта автоматизации

В рамках создания АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества, необходимо спроектировать камеру сгорания, условия внутри которой будут приближены к условиям внутри реальных дизельных двигателей, которая будет использоваться в составе лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований. Было определено, что внутри проектируемой камеры будет поддерживаться температура до 500 °С и давление до 15 Бар. Обязательно также наличие смотровых стекол для фиксации экспериментальных исследований на высокоскоростную камеру для дальнейшей обработки при помощи метода SP (SHADOW PHOTOGRAPHY) (теневая фотография образов частиц), схема данного метода представлена на рисунке 5 [45].

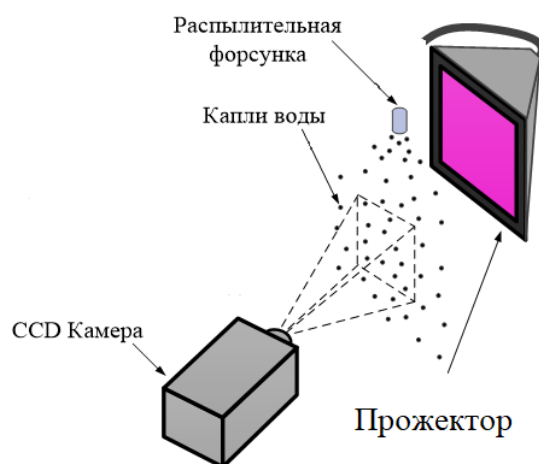


Рисунок 5 – Схема метода SP

В рамках данной работы была спроектирована собственная камера сгорания, выполненная из нержавеющей стали марки: 12х18н10т. Размеры камеры без опор (ШхВхГ): 53х600х399 мм.

Сверху и снизу камеры предусмотрены съёмные крышки для доступа внутрь камеры с целью возможной замены вышедшего из строя оборудования, а также чистки внутренней поверхности от нагара и удаления несгоревшей части композиционных жидких топлив.

Для уменьшения теплопотерь, а также безопасности необходимо предусмотреть теплоизоляцию вокруг основного корпуса камеры. Установка теплоизоляции планируется на клей, прижав снаружи обечайкой из листового металла. Теплоизоляция будет приставлена двумя материалами, в качестве первого слоя будет использован базальтокартон, в качестве второго слоя будет использован керамический утеплитель. Все необходимые, для изготовления камеры сгорания, чертежи представлены на листах с шифром ФЮРА.421000.010 СБ-01...09.

2.2 Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления

Основным элементом автоматизированной системы является камера сгорания, в которой осуществляется сжигание композиционного топлива. Композиционное топливо подается в камеру сгорания через специальное пневматическое форсуночное устройство (Ф). В данной форсунке предусмотрено 3 отверстия: для подачи вода при помощи водяного насоса (В), для подачи топлива при помощи топливного насоса (ТН), и воздуха при помощи компрессора (К).

Контроль температуры в камере сгорания осуществляется при помощи датчика температуры (ДТ). Давление в камере сгорания контролируется при помощи датчика давления (ДД-1), также для удобства оператора предусмотрен один показывающий датчик давления (ДД-2), для нагнетания давления используется баллон с азотом, регулирование подачи азота осуществляется при помощи регулирующего клапана (РК1), снижение давления осуществляется при помощи вакуумметрического насоса (ВН). Данные с (ДТ), (ДД-1) и (РК-1) поступают на ПЛК, таким образом, контроллер в зависимости от заданной уставки вырабатывает управляющее воздействие на нагреватели, которых в данной системе предусмотрено четыре (Н-1-4), и (РК-1) который

закрывает/открывает клапан который позволяет нагнетать давление, при необходимости понизить давление в камере сгорания сигнал с ПЛК поступает на (ВН). Для аварийного сброса давления предусмотрен клапан, открывающийся при достижении критического значения давления, установленного ранее.

В системе также присутствует АРМ – автоматизированное рабочее место оператора, на рабочем месте оператора имеется персональный компьютер, на котором отображается мнемосхема технологического процесса. При помощи специализированных программ оператор имеет возможность отслеживать параметры и влиять на ход технологического процесса, находясь на расстоянии от самого лабораторного стенда.

На листе с шифром ФЮРА.421000.010 С1 представлена структурная схема комплекса технических средств автоматизированной системы управления.

В выбранной системе присутствует ряд измеряемых (температура, давление, концентрация кислорода в дымовых газах) и регулируемых параметров (положение регулирующих клапанов). Их перечень и номинальные значения представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные измеряемые и регулируемые параметры

Параметр	Номинальное значение
Температура в камере сгорания, °С	0...500
Давление в камере сгорания, бар	0...15
Концентрация кислорода в дымовых газах, %	0...3
Степень открытия регулирующего клапана подачи азота, %	0...100

2.3 Разработка функциональной схемы системы управления

Функциональная схема является одним из основных технических документов, данная схема позволяет определить функционально-блочную структуру отдельных узлов. К таким узлам относятся: узел автоматического контроля, узел регулирования и управления технологического процесса. Также

при использовании данной схемы главным образом определяется оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации. Условные обозначения запорной арматуры определены в ГОСТ 2.785-70 [7], первичные и функциональные измерительные приборы – ГОСТ 21.208-2013 [8].

При составлении функциональной схемы все технологическое оборудование следует изображать в виде контуров, упрощённых до такой степени, которая позволяет показать взаимосвязь отдельных частей технологической цепи, принцип её действия, а также взаимодействие с различными техническими средствами системы автоматизации [46].

В ходе разработки функциональной схемы были определены измерительные каналы (1-8, 11), каналы регулирования (4-7, 9, 10, 12-15), каналы сигнализации (1-2). В измерительных каналах используется аналоговый сигнал, а в каналах регулирования – дискретный.

Датчик температуры 1а и датчик давления 2а передают данные о температуре и давлении внутри камеры сгорания по каналам 1-2 соответственно. При помощи канала 4, 5, 6, 7 передается управляющее воздействие, а также сведения о работе водяного насоса, топливного насоса, компрессора и вакуумного насоса соответственно. С помощью РК-1 регулируется подача азота в камеру сгорания по каналу 10, а по каналу 11 передается информация о положении выходного вала исполнительного механизма.

Данные с датчика давления 3а, позволяют оператору немедленно увидеть значение давления внутри камеры сгорания.

В данной системе определено наличие технологической сигнализации по каналам (1-2), данная сигнализация позволяет оператору мгновенно увидеть превышение давления или температуры внутри камеры сгорания, быстро среагировать и внести необходимые корректировки в работу системы или произвести аварийную остановку процесса.

2.4 Выбор технических средств системы управления, составление спецификации

Осуществлять выбор ТСА будем, основываясь на параметры надежности, стоимость, экономические и метрологические характеристики.

2.4.1 Выбор датчиков температуры

В разрабатываемой системе необходимо измерять температуру внутри камеры сгорания. Осуществим выбор датчика температуры для камеры сгорания. В таблице 4 представлены основные технические характеристики датчиков температуры [47 – 48].

Таблица 4 – Технические характеристики датчиков температуры

Параметр	Тип датчика температуры, характеристика		
	ДТІІN295-0918.630.1	Метран-288	Метран-2700
Диапазон измерения	-40...+1250 °С	-50...+1200 °С	-40...+1000 °С
НСХ	N	K	K
Класс допуска	1	2	2
Выходной сигнал	4...20 мА	4...20 мА	4...20 мА
Степень защиты	IP54	IP67	IP65
Цена	от 9576 руб.	от 17000 руб.	от 20000 руб.

Выберем датчик типа Метран-288 от производителя «МЕТРАН», поскольку он имеет оптимальную стоимость и высокую степень защиты.

2.4.2 Выбор датчиков давления

В рассматриваемой АСУ одним из наиболее важных контролируемых параметров является давление в камере сгорания. Контроль данного параметра будет осуществляться при помощи датчика давления, сигнал с которого будет поступать на контроллер, поэтому необходимым условием является наличие выходного сигнала 4...20 мА. В таблице 5 представлены основные технические характеристики датчиков давления [49 – 51].

Таблица 5 – Технические характеристики датчиков давления

Параметр	Тип датчика давления, характеристика		
	MBS 1750	WIKА МН-2	РОСМА РПД
Диапазон измерения	от 0 до 60 бар	от 0 до 200 бар	от 0 до 60 бар
Выходной сигнал	4...20 мА	4...20 мА	4...20 мА
Класс точности	0,5	0,1	0,5
Степень защиты	IP65	IP67	IP65
Цена	от 8600 руб.	от 12150 руб.	от 6080 руб.

Выберем датчик РОСМА РПД, так как он обладает необходимыми характеристиками и приемлемой ценой.

Также в данной системе предусмотрен показывающий датчик давления, в качестве данного датчика в данной системе был выбран манометр стандартного исполнения типа ТМ от производителя ЗАО «РОСМА» [51].

2.4.3 Выбор топливного насоса

Топливо внутрь камеры сгорания будет поступать через форсунку, в которую в свою очередь будет нагнетать туда топливный или масляный насос. В таблице 6 представлены основные технические характеристики насосов [52 – 53].

Таблица 6 – Технические характеристики насосов

Параметр	Тип насоса, характеристика		
	Wipcool R4 16 Бар	YonJou EN733	МТО 16/22
Напряжение	230 В, 50 Гц	230 В	230 В
Максимальное давление	16 бар	16 бар	16 бар
Пропускная способность	150 мл	140 мл	220 мл
Цена	от 50000 руб.	от 63000 руб.	от 4000 руб.

Таким образом, на основании вышеупомянутых критериев выбираем МТО 16/22 из-за привлекательности цены и подходящих, для работы в системе, характеристик.

2.4.4 Выбор вакуумметрического насоса

Для отвода газа из камеры сгорания и тем самым снижения давления внутри камеры в системе предусмотрено наличие вакуумметрического насоса. В таблице 7 представлены основные технические характеристики насосов [55 – 57].

Таблица 7 – Технические характеристики вакуумметрических насосов

Параметр	Тип насоса, характеристика		
	UV-2004	KNF N816.3KT.18	ЭКРОС-3935В
Напряжение	230 В, 50 Гц	230 В	230 В
Максимальное рабочая скорость	4 л/м	8 л/м	4 л/м
Среда для работы	Различные газы, в том числе агрессивные	Различные газы, в том числе агрессивные	Неагрессивные газы
Цена	от 40000 руб.	от 98000 руб.	от 50000 руб.

Выбираем вакуумный насос UV-2004, поскольку он обладает необходимыми характеристиками, а также наименьшей ценой.

2.4.5 Выбор газоанализатора

Для измерения содержания кислорода в дымовых газах и отслеживанием контроля качества горения в данной системе предусмотрено наличие газоанализатора. В таблице 8 представлены основные технические характеристики газоанализаторов [58 – 60].

Таблица 8 – Технические характеристики газоанализаторов

Параметр	Тип газоанализатора, характеристика		
	Многокомпонентный газоанализатор МАГ-6Т-8-В-16А	Анализатор качества горения АКГ-МП-2П	Полустационарный газоанализатор MGA5 plus
Измеряемые газы	$O_2, CO, NO, NO_2, SO_2, H_2S, H_2, CH_4, C_3H_8$	$O_2, CO, NO, NO_2, SO_2, H_2S, H_2, CH_4, C_3H_8$	$O_2, CO, NO, NO_2, SO_2, H_2S, H_2, CH_4, C_3H_8$
Количество каналов измерения	1	2	6
Класс точности	1	2	2

Продолжение таблицы 8

Параметр	Тип газоанализатора, характеристика		
	Тип газоанализатора, характеристика	Параметр	Тип газоанализатора, характеристика
Выходной сигнал	4...20 мА	4...20 мА	4...20 мА
Цена	от 31800 руб.	от 11900 руб.	от 100000 руб.

Выбираем анализатор качества горения MGA5 plus, поскольку он обладает большим количеством измерительных каналов.

2.4.6 Выбор исполнительного механизма

Исполнительный механизм необходимо выбирать, учитывая вид РО – регулирующего органа, значение крутящего момента [61]. Выберем привод электрогидравлический SKD60 [62] от производителя Siemens. Технические характеристики, представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики исполнительного механизма

Параметр	Характеристика
Усилие позиционирования	1000 Н*м
Ход штока	20 мм
Напряжения питания	24 В
Наличие пружинного возврата	Да
Время открытия	30 секунд
Время закрытия	15 секунд
Управляющий сигнал	0-10 В

Данный привод оснащен возвратной пружиной, которая при срабатывании возвращает шток в положение хода «0%», срабатывание пружины происходит при потере электропитания или потере управляющего воздействия, данная особенность привода существенно повышает безопасность при использовании лабораторного стенда. Помимо этого, особенностью данного привода является компактный корпус и наличие ручного регулятора.

2.4.7 Выбор программируемого логического контроллера

Контроллер в данной работе должен обладать достаточным количеством аналоговых и дискретных входов и выходов, иметь возможность оснащения дополнительными модулями [47,63-64].

Технические характеристики контроллеров представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Технические характеристики контроллеров

Марка контроллера	ПЛК200-04- CS	Элси - ТМК	SIMATIC-S7- 200
Напряжение питания	~220 В, 50 Гц; 24 В	~220 В, 50 Гц; 24 В	~220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, для переменного тока, ВА	13	20	12
Параметры встроенного вторичного источника питания, выходное напряжение, В	24±3	24 ± 4 В	24±3
Возможность выбора необходимых модулей	да	да	да
Разрядность АЦП, бит	32	32	32
Среда программирования	Codesys	Codesys	Step7

Выбираем контроллер ПЛК200-04-CS, так как контроллер имеет возможности расширения, приемлемую цену = 58020 р и доступен для заказа.

Вместе с контроллером выберем ряд дополнительного оборудования, необходимого в шкафу автоматизации. Выбранные модули, а также источник бесперебойного питания, аккумуляторная батарея, коммутатор представлены в таблице 11. Подключение модулей будет осуществляться с помощью стандартной схемы: контроллер будет подключен напрямую к АРМ и к сетевому коммутатору, к которому в свою очередь последовательно будут подключаться остальные выбранные модули, для всех подключений будет использоваться кабель ethernet.

Таблица 11 – Оборудование для ПЛК

Наименование	Цена
МВ210-101 / Модуль аналогового ввода	19980
МВ210-204 / Модуль дискретного ввода	14160
МУ210-401 / Модуль дискретного вывода	13740
ИБП60К-24 / Источник питания с резервированием	9900
Аккумулятор 12В 7АЧ	1920
ПЛК200-04-CS/ Программируемый логический контроллер	58020
КСН210-5 / Коммутатор сетевой неуправляемый	7200

2.5 Составление перечней входных и выходных сигналов

Для реализации системы необходимо наличие в контроллере 3 аналоговых входов для измерения параметров (температура, давление, концентрация выхлопных газов) технологического процесса. Также в системе необходимо предусмотреть 15 дискретных входов для получения информации о состоянии работы оборудования и 14 дискретных выходов для создания управляющего воздействия. Нужно так же предусмотреть наличие резервных входов и выходов для сигналов. Перечень входных и выходных сигналов представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Перечень входных и выходных сигналов

Наименование параметра	AI	AO	DI	DO
Температура в камере сгорания	+			
Давление в камере сгорания	+			
Концентрация выхлопных газов	+			
Высокое давление внутри камеры			+	
Топливный насос включен			+	
Топливный насос отключен			+	
Насос подачи воды включен			+	
Насос подачи воды отключен			+	
Вакуумметрический насос включен			+	
Вакуумметрический насос отключен			+	
Нагреватель 1 включен			+	
Нагреватель 1 отключен			+	
Нагреватель 2 включен			+	
Нагреватель 2 отключен			+	
Нагреватель 3 включен			+	
Нагреватель 3 отключен			+	
Нагреватель 4 включен			+	
Нагреватель 4 отключен			+	
Топливный насос включить				+
Топливный насос отключить				+
Насос подачи воды включить				+
Насос подачи воды отключить				+
Вакуумметрический насос включить				+
Вакуумметрический насос отключить				+
Нагреватель 1 включить				+
Нагреватель 1 отключить				+
Нагреватель 2 включить				+
Нагреватель 2 отключить				+
Нагреватель 3 включить				+
Нагреватель 3 отключить				+
Нагреватель 4 включить				+
Нагреватель 4 отключить				+

2.6 Разработка принципиальной электрической схемы щита управления

При разработке электрической схемы важно определить полную конфигурацию оборудования, аппаратуры и приборов и показать все необходимые соединения между ними. Эта схема является основой для подготовки других проектных документов: схем подключения панелей и пультов, схем внешних соединений и т.д. Разработка данной схемы должна начинаться с краткого изложения четких технических требований и выделения условий эксплуатации последовательности работы данной схемы на основе

установленных требований. Условия представляются в виде элементарных схем, которые затем объединяются в общую схему. Затем на основе проектирования отдельных элементов выбирается необходимое оборудование, и при необходимости корректируется принципиальная схема. Другим важным этапом подготовки схемы является проверка на наличие возможных ложных или обходных цепей, также следует рассмотреть возможные решения для устранения неисправностей в случае повреждения элементарных цепей или контактов, после чего принимается окончательная схема[65]. При разработке схемы графическое обозначение элементов и соединяющие их линии связи располагаются на схеме таким образом, чтобы обеспечить наилучшее представление о взаимодействии её составных частей. Линии связи состоят из горизонтальных и вертикальных отрезков.

При разработке схемы выполнены следующие действия:

- начертить на схеме условные изображения технических средств автоматизации;
- произведены соединения проводок с клеммами устройств;
- произведена нумерация проводников.

Ввод питания в щит управления осуществляется через блок зажимов XT1. В щите предусмотрена розетка XS1. Внутри щита располагается устройство защиты от перенапряжения. Для питания устройств внутри щита имеется источник питания от производителя «ОВЕН» – ИБП60К-24, данный источник питания имеет возможность автоматически переходить на резервное питание нагрузки от АКБ, которые также располагаются в шкафу управления в количестве: 2 шт. Для прекращения подачи напряжения на устройства в щите управления предусмотрены выключатели.

Схема принципиальная электрическая щита управления представлена на листах с шифром ФЮРА.421000.010 Э4.

2.7 Составление перечня элементов щита управления

Список всех аппаратов схемы и их основные характеристики записываются в перечень, представляющий из себя таблицу с обязательным указанием номера позиции по заказной спецификации, обозначения по принципиальной электрической схеме, наименование, тип, количество и примечания [66].

Заполнение таблицы выполнено в соответствии с принципиальной электрической схемой. В перечень элементов вписаны вся аппаратура и приборы данной схемы, а именно: программируемый логический контроллер, источники бесперебойного питания, автоматические выключатели, преобразователи искробезопасные разделительные, вилка преобразователей искробезопасных разделительных, розетка однофазная, блоки зажимов.

На отдельном листе с шифром ФЮРА.421000.010 ПЭ4 представлен перечень элементов принципиальной электрической схемы щита управления.

2.8 Проектирование схемы внешних проводок

Монтажная документация предназначена для выполнения монтажных работ. Эту документацию также используют в процессе эксплуатации, наладке, ремонте и выполнении профилактических работ. Для сложных систем автоматизации отдельно выполняют монтажные схемы щитов, пультов, внешних электрических и трубных проводок.

Монтажные схемы главным образом определяют, основные соединения между клеммами внутри щита и техническими средствами, расположенными на конструкции и за пределами конструкций [67].

Схема соединений внешних электрических проводок представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.010 С4.

Первичные преобразователи и щит управления соединены между собой электрическими линиями связи различной длины, выполненными с помощью электрических кабелей КВВГнг. Также присутствует ввод питания к щиту автоматизации, выполненный с помощью кабеля ВВГнг(А)-LS-3×1,5. Линии

связи от первичных преобразователей объединены с помощью двух коробок соединительных клеммных КСК. Все линии связи пронумерованы.

Для АСУ ТП вторичного измельчения капель композиционных топлив в камере сгорания схема соединений внешних проводок представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.0010 С4.

2.9 Разработка общего вида щита управления

Щиты управления и автоматизации отвечают за измерение и контроль значений основных параметров протекающих технологических процессов обслуживаемых систем. Чертеж общего вида щита поясняет принцип его работы, показывает его конструкцию и как взаимодействуют его части [68].

Для размещения технических средств был выбран компактный распределительный шкаф Rittal AX, артикул: 1180.000.

Шкаф собран из листовой стали. Основные характеристики представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Основные характеристики шкафа

Технические характеристики	
Степень защиты	IP 66
Размер (ШхВхГ), мм	800x1000x300
Размеры монтажной панели (ШхВхГ), мм	745x975x2,5
Вес, кг	52

В верхней части щита расположены осветительный прибор EL1 и концевой выключатель SQ1. В первом ряду расположен контроллер AC1, необходимые модули A1...A5 сетевой коммутатор и щитовая розетка XS1. Во втором ряду расположены автоматические выключатели QF1...5, устройство защиты от перенапряжений Z01, модули питания G1...2, термореле KK1. В третьем ряду расположены реле K1...K18 и частотные преобразователи G6...7, преобразователи измерительные разделительные ET-422 UY1...7. В нижней части щита расположены клеммные колодки XT1, XT2, XT3, XT4, XT5, XT6,

ХТ7, ХТ01. На лицевой верхней стороне расположены сигнальные лампы НЛ1... НЛ8. В нижней части указано обозначение фильтрующего вентилятора М1.

Чертеж общего вида щита управления представлен на отдельном листе с шифром ФЮРА.421000.010 СБ. Перечень составных частей общего вида щита управления представлен на отдельных листах с шифром ФЮРА.421000.003 СП.

2.10 Разработка фрагментов информационного, математического и программного обеспечений

Информационное обеспечение – это совокупность систем кодирования и классификации технологической и технико-экономической информации.

Математическое обеспечение – это комплекс математических методов, моделей и алгоритмов решения задач, методов обработки информации и формирования команд управления для воздействия на технологические процессы.

Программное обеспечение – совокупность программ и эксплуатационной программной документации, необходимых для реализации функций АСУТП и заданного режима функционирования КТС.

В рамках данной работы было создано приложение для сотрудников лаборатории, планирующих проводить эксперименты с данным стендом. Приложение создано в ПО – Microsoft Visual Studio, используя интерфейс программирования приложений — Windows Forms. Программный код для приложения написан на языке С#.

Приложение состоит из двух окон, переключение между которыми производится с помощью нажатия на соответствующую вкладку, в верхнем левом углу окна. На первом окне, представленном на рисунке 14, пользователю предоставляется возможность рассчитать характеристики микро-взрывной фрагментации капель двухсоставной жидкости. Расчет производится по полученным ранее аппроксимационным выражениям исходя из полученных экспериментальных данных.

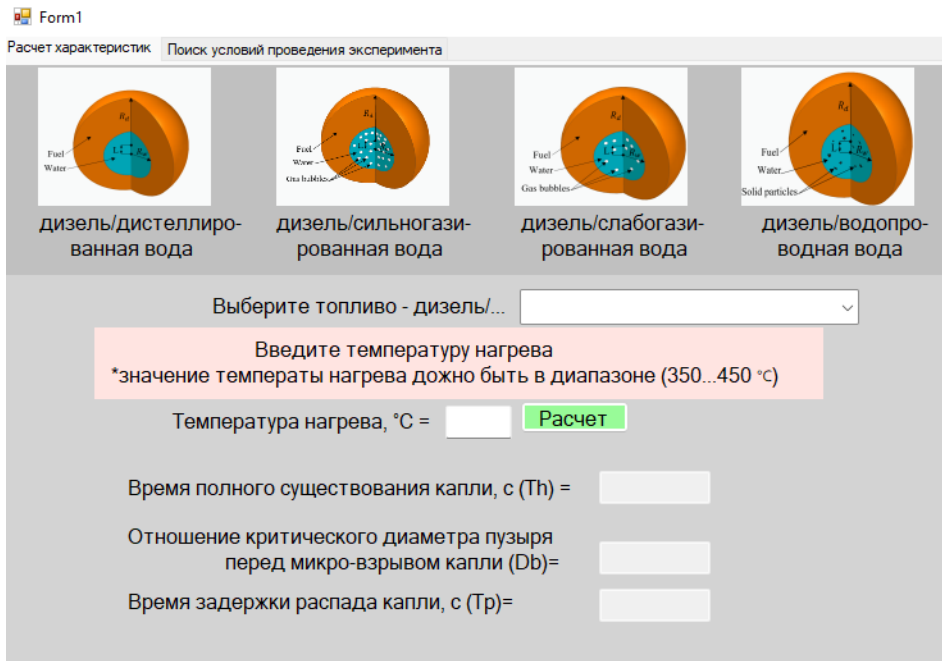


Рисунок 14 – Окно расчета характеристик

Для начала пользователю необходимо выбрать соответствующее топливо, и ввести необходимую температуру нагрева.

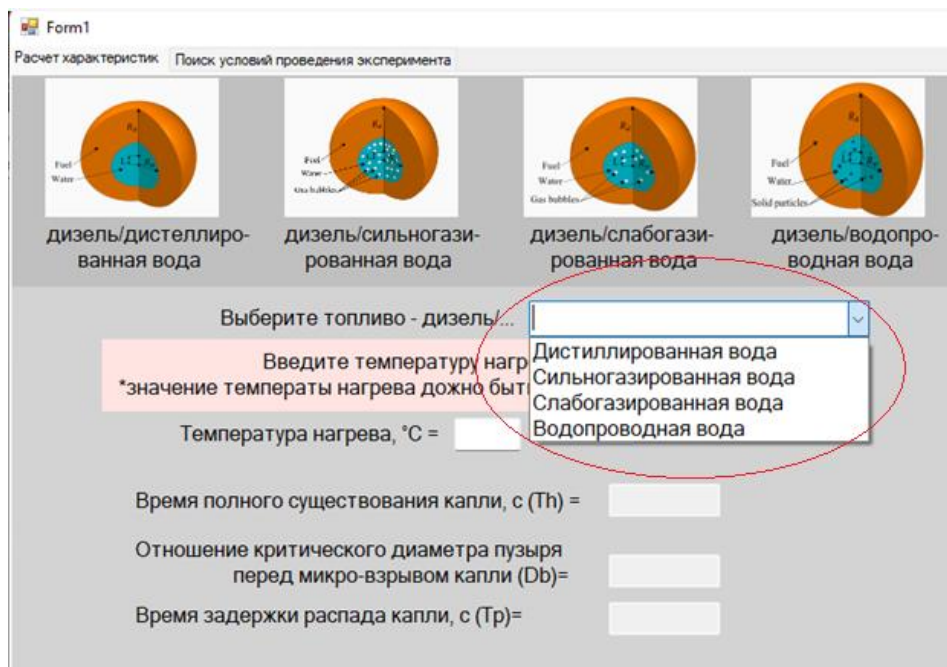


Рисунок 15 – Выбор необходимого топлива

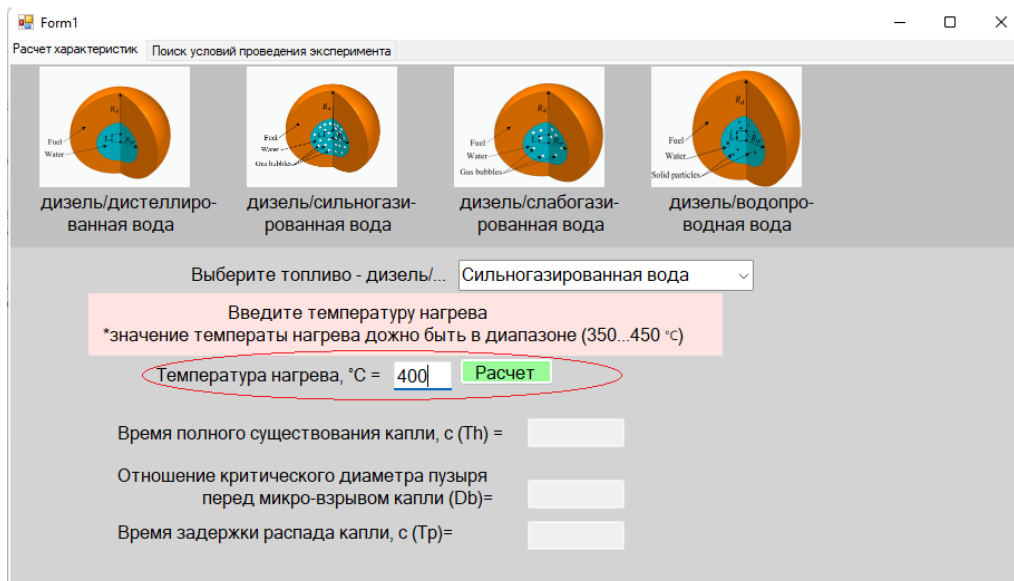


Рисунок 16 – Ввод необходимой температуры нагрева

Далее нажимаем кнопку расчет и в нижней части экрана видим рассчитанные характеристики.

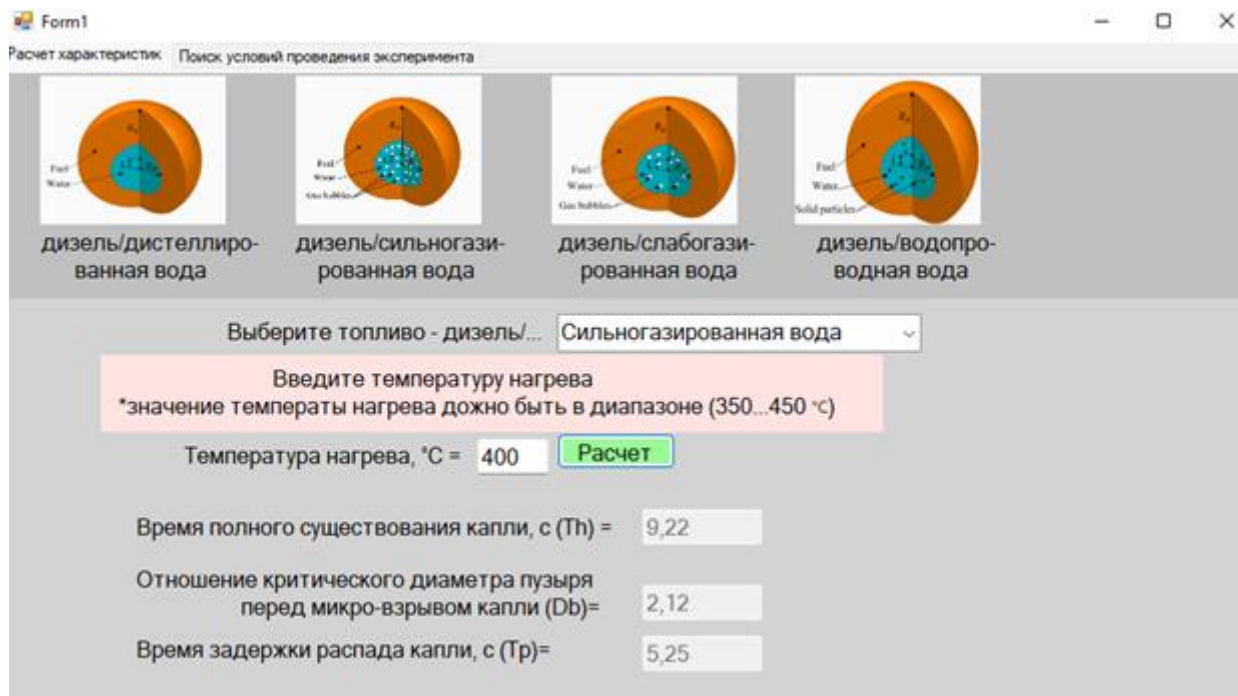


Рисунок 17 – Пример расчета характеристик

Важно отметить, что при вводе пользователем некорректного значения температуры, приложение покажет в отдельном окне ошибку, окно ошибки показано на рисунке 18, после нажатия кнопки “ок” поле ввода температуры очистится и пользователь сможет ввести корректное значение и продолжить расчет.

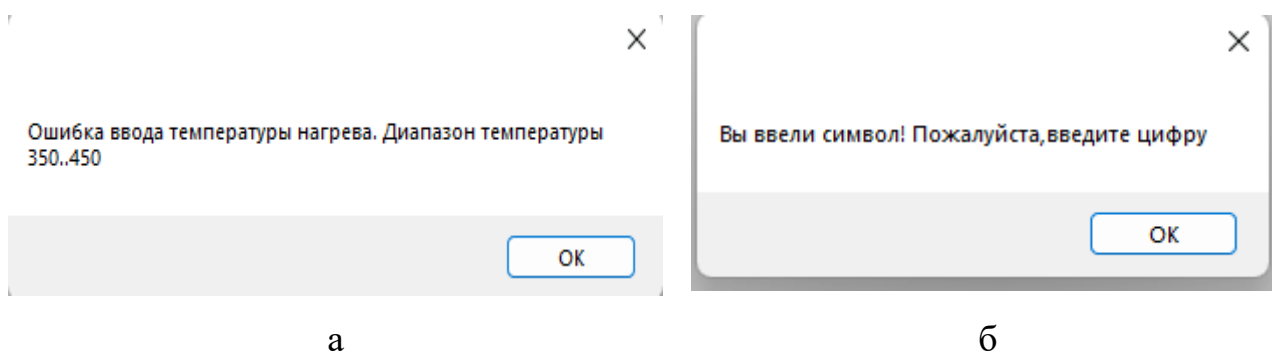


Рисунок 18 – Окно ошибки ввода значения температуры: а – введено значение вне диапазона, б – присутствует некорректный символ

На втором окне, представленном на рисунке 19, пользователь может произвести поиск условий эксперимента для достижения необходимого значения задержки распада двухжидкостной капли.

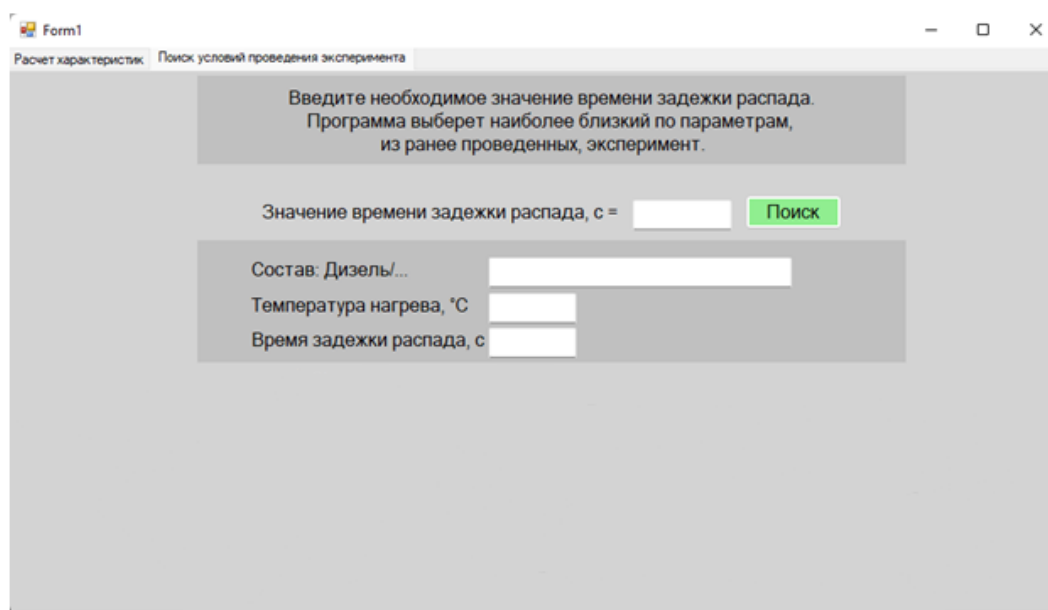


Рисунок 19 – Окно поиска условий эксперимента

Пользователю необходимо ввести необходимое значение времени задержки распада капли. Далее приложение найдет наиболее близкое значение и представит условия для проведения эксперимента, значения условий будут взяты из ранее проведенных экспериментов. Пример поиска условий представлен на рисунке 20.

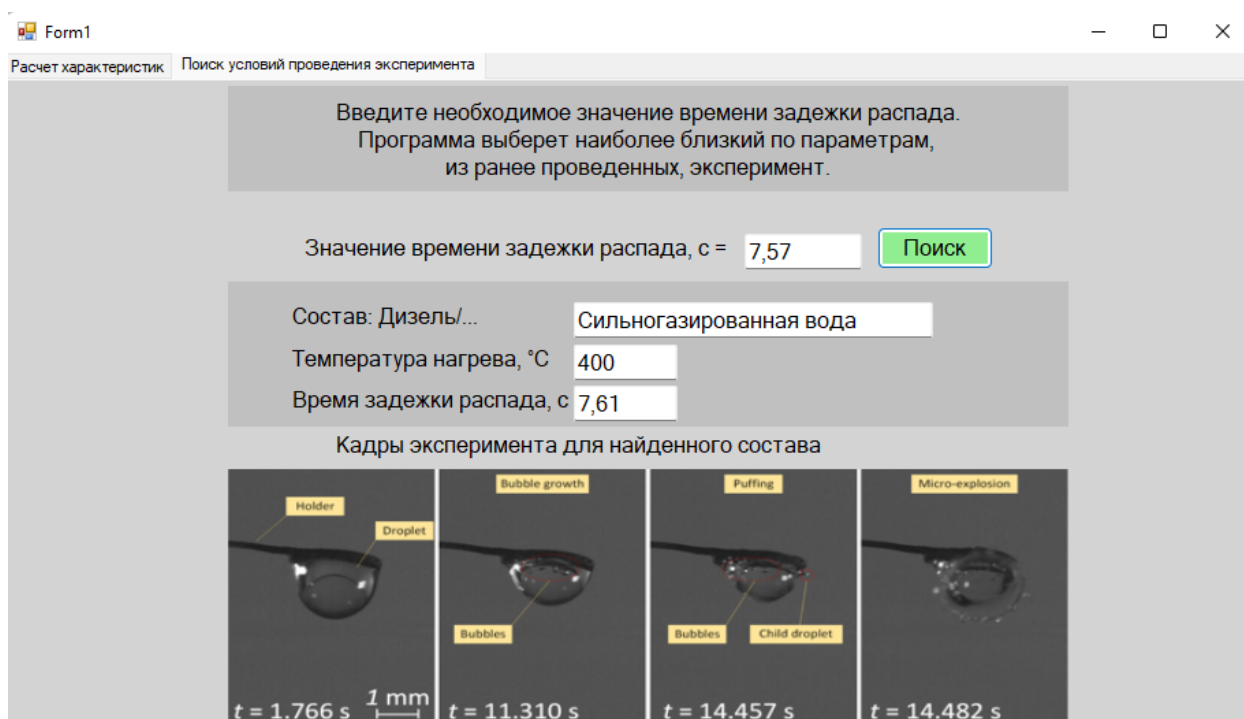


Рисунок 20 – Пример поиска условий эксперимента

Для решения данной задачи необходимо было создать базу данных, в которую будут вноситься значения, полученные экспериментально. База данных создана при помощи веб-приложения с открытым кодом (phpMyAdmin), главное окно представлено на рисунке 21.

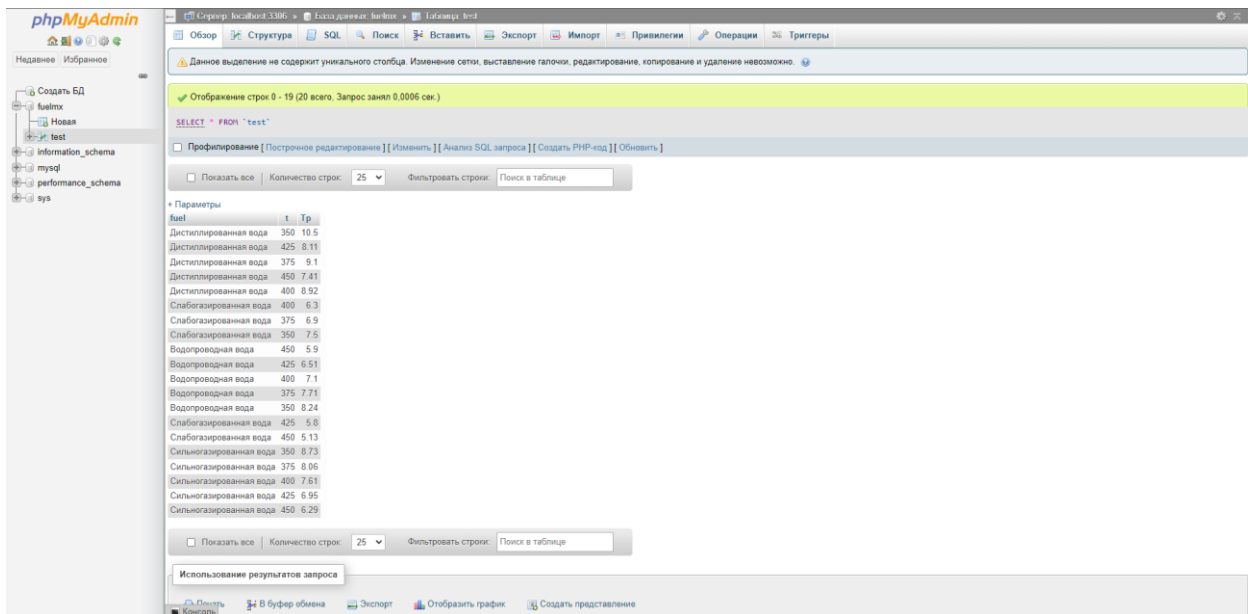


Рисунок 21 – Главное окно приложения phpMyAdmin

Данное приложение, представляющее собой веб-интерфейс для администрирования СУБД MySQL, позволяет через браузер осуществлять администрирование сервера MySQL, запускать команды SQL, просматривать и редактировать содержимое таблиц и баз данных. Таблица с импортированными в базу данных значениями из проведенных ранее экспериментов представлена на рисунке 22.

fuel	t	Тр
Дистиллированная вода	350	10.5
Дистиллированная вода	425	8.11
Дистиллированная вода	375	9.1
Дистиллированная вода	450	7.41
Дистиллированная вода	400	8.92
Слабогазированная вода	400	6.3
Слабогазированная вода	375	6.9
Слабогазированная вода	350	7.5
Водопроводная вода	450	5.9
Водопроводная вода	425	6.51
Водопроводная вода	400	7.1
Водопроводная вода	375	7.71
Водопроводная вода	350	8.24
Слабогазированная вода	425	5.8
Слабогазированная вода	450	5.13
Сильногазированная вода	350	8.73
Сильногазированная вода	375	8.06
Сильногазированная вода	400	7.61
Сильногазированная вода	425	6.95
Сильногазированная вода	450	6.29

Рисунок 22 – База данных с значениями ранее проведенных экспериментов

2.11 Разработка экранных форм мнемосхем SCADA-системы

Мнемосхема, разработанная для системы автоматического регулирования процесса вторичного измельчения капель композиционных топлив в камере сгорания, представлена на рисунке 23.

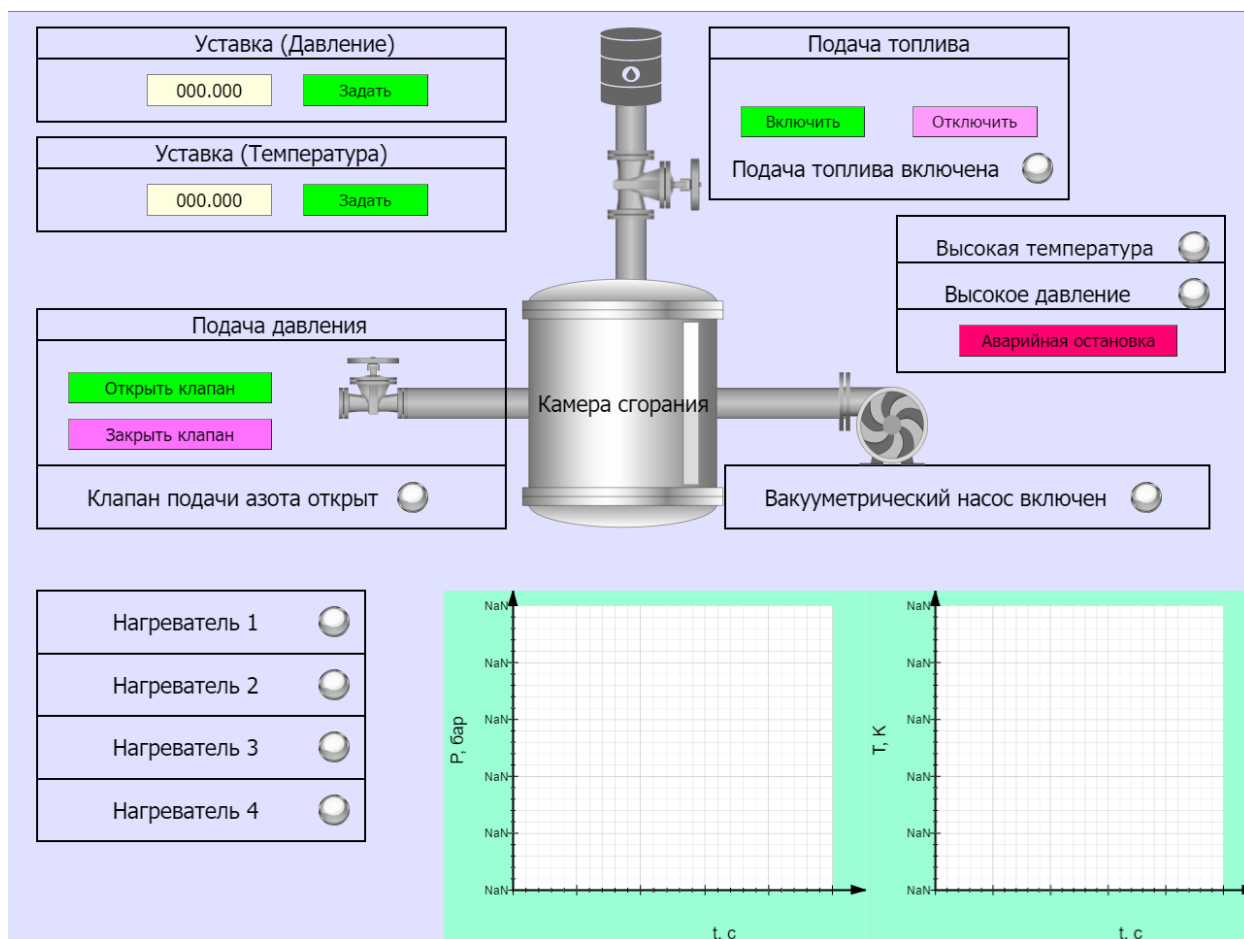


Рисунок 23 – Окно SCADA

Главной частью SCADA-системы является упрощенный технологический процесс, изображенный в виде труб, регулирующих клапанов, камеры сгорания. В правой нижней части окна располагаются графики давления и температуры в камере сгорания.

Далее представлены функции разработанной SCADA системы:

- отображаются состояние клапана подачи азота, вакуумметрического насоса;

- на трендах отображаются значения температуры, давления внутри камеры сгорания;
- в левом верхнем углу задаются необходимые условия внутри камеры сгорания, а именно температура и давление;
- в правом нижнем углу отображается состояние работы нагревателей;
- сверху справа находятся кнопки включения и отключения подачи топлива, а также индикатор состояния;
- имеются кнопки принудительного открытия и закрытия клапана подачи азота;
- кнопки «Включить» и «Отключить», используются для включения форсуночного устройства и последующей подачи топлива в камеру сгорания;
- при нажатии кнопки «Аварийная остановка» клапан подачи азота закрывается на некоторое время остается включен вакуумметрический насос, нагреватели выключаются, параметры технологического процесса постепенно возвращаются в начальные условия.

2.12 Выводы по разделу

В ходе выполнения данного раздела была разработана АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества. Спроектированная система является трехуровневой. Полевой уровень включает датчики измерения температуры, давления, концентрации, а также запорную арматуру и исполнительные механизмы. На среднем уровне располагается контроллер компании «ОВЕН», на верхнем уровне – АРМ оператора.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ13	Разумову Дмитрию Сергеевичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ И. Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» Автоматизация теплоэнергетических процессов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами. Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- районный коэффициент- 1,3; - накладные расходы – 20%
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды (30,2%)
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	1. Анализ конкурентных технических решений; 2. FAST-анализ;
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1. Планирование работ.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	1. Смета затрат на проект; 2. Смета затрат на оборудование; 3. Расчет бюджетной стоимости НТИ.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение ресурсной эффективности исследования.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Анализ конкурентных технических решений 2. Диаграмма FAST 3. Диаграмма Ганта	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ13	Разумов Дмитрий Сергеевич		

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В рамках данной магистерской диссертации разрабатывается АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества. Внедрение такой системы позволит минимизировать расходы топлива, повысить динамику процесса горения, поспособствует снижению антропогенных выбросов и повышению полноты выгорания топлива, улучшит качества и в тоже время удешевит процесс подготовки, распыления и сжигания топлива.

Целью написания данного раздела является расчет экономической эффективности разработки АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества. Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

При проектировании новой системы или модернизации старой системы с экономической точки зрения важным является определение границ эффективности и бюджета. В рамках данного проекта разрабатываемая система должна соответствовать высоким показателям ресурсоэффективности по основным критериям (помехоустойчивость, безопасность, надежность, энергосбережение, удобство эксплуатации и материалоемкость).

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

К потенциальным потребителям результатов исследования данной магистерской диссертации можно отнести: компании по проектированию и изготовлению двигателей внутреннего сгорания; лаборатории, проводящие научные исследования; компании по производству систем пожаротушения. Для анализа потребителей необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. В зависимости от категории потребителей необходимо использовать соответствующие критерии сегментирования. Карта сегментирования приведена в таблице 14.

Таблица 14 – Карта сегментирования

		Сфера использования		
		Компании по проектированию и изготовлению двигателей внутреннего сгорания	Лаборатории, проводящими научные исследования	Компании по производству систем пожаротушения
Размер организации	Крупные			
	Средние			
	Мелкие			

Таким образом, из таблицы 14 можно сделать вывод о не занятых конкурентами нишах на рынке услуг. Именно на них можно направить ресурсы и усилия при разработке автоматической системы.

3.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения [69].

По своим основным принципам и целям проектирования варианты автоматизированных систем разных производителей идентичны. Однако по техническим и экономическим критериям они будут значительно различаться. Каждый производитель придерживается своих требований при разработке

автоматизированных систем. Так, например, одни производители делают акцент на надежность, помехоустойчивость, а другие на дешевизну. Примерами конкурирующих производителей автоматизированных систем являются ЭЛЕСИ и Siemens.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты. Необходимо сравнить разрабатываемую технологию (индекс «К₁») с конкурентными технологиями на базе производителей ЭЛЕСИ (индекс «К₂») и Siemens (индекс «К₃»).

Конкурентоспособность научной разработки рассчитывается с использованием следующей формулы:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (13)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки; V_i – вес показателя измеряется в долях единицы; B_i – балл i-го показателя.

В таблице 15 представлена оценочная карта результатов анализа конкурентных технических решений.

Таблица 15 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Надежность	0,25	5	5	5	1,25	1,25	1,25
2. Помехоустойчивость	0,15	4	4	5	0,6	0,6	0,75
3. Простота программирования и использования интерфейса	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Стоимость	0,25	5	3	1	1,25	0,75	0,25
2. Длительность изготовления продукта	0,1	5	4	1	0,5	0,4	0,1
3. Конкурентоспособность	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
4. Наличие сертификата качества научной разработки	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Итого	1				4,75	4,05	3,3

Оценочная карта наглядно показывает преимущества и недостатки каждого технического решения и позволяет сделать вывод о том, что разрабатываемая автоматическая система управления является конкурентоспособной. Анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование для обеспечения конкурентоспособности своего товара на рынке.

3.3 FAST - анализ

FAST - анализ – это методология, которая помогает определить ключевые параметры продукта или услуги на начальном этапе разработки. Она заключается в исследовании функциональности, применения, структуры и технологии продукта. Данный анализ включает в себя 6 этапов.

3.3.1 Выбор объекта FAST – анализа

Объектом FAST – анализа в данной работе является – автоматическая система управления микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества.

3.3.2 Описание функций объекта

В рамках данной стадии FAST-анализа объект анализируется с позиции функционального устройства. Определяются функции объекта - главные, основные и вспомогательные. Главная функция объекта – внешняя функция, определяющая сущность, назначение и главную цель создания объекта. Основные и вспомогательные функции отражают внутренние функции исследуемого объекта.

В таблице 16 представлена классификация функций, выполняемых объектом исследования.

Таблица 16 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование	Выполняемые функции	Ранг функции		
		Главная	Основная	Вспомогательная
Автоматизированная система	Обеспечение повышения эффективности управления объектом исследования	+		
Программные средства	Выполнение комплекса программ и отдельных задач		+	
Аппаратные средства	Обеспечение режима автоматического управления		+	
Персонал	Обеспечение режима ручного управления		+	
SCADA – система	Обеспечение визуализации технологического процесса			+

3.3.3 Определение значимости выполняемых функций объектом

Для оценки значимости функций используем метод расстановки приоритетов, предложенный Блюмбергом В.А. и Глуценко В.Ф. В основу данного метода положено расчетно-экспертное определение значимости каждой функции [69].

На начальном этапе составляем матрицу сложности функций (таблица 17). Функции определены согласно таблице 3 в порядке упоминания.

Таблица 17 – Матрица смежности функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5
Функция 1	=	>	>	>	>
Функция 2	<	=	=	=	>
Функция 3	<	=	=	=	>
Функция 4	<	=	=	=	>
Функция 5	<	<	<	<	=

Преобразуем матрицу смежности (таблица 17) в матрицу количественных соотношений функций (таблица 18).

Таблица 18 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	ИТОГО
Функция 1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	7
Функция 2	0,5	1	1	1	1,5	5
Функция 3	0,5	1	1	1	1,5	5
Функция 4	0,5	1	1	1	1,5	5
Функция 5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	3
						$\Sigma=25$

Далее определяем значимость функции путем деления балла, полученного по каждой из функций, на общую сумму баллов по всем функциям (таблица 19).

Таблица 19 – Относительная значимость функций

Функция	Относительная значимость
Автоматизированная система	0,28
Программные средства	0,2
Аппаратные средства	0,2
Персонал	0,2
SCADA – система	0,12

3.3.4 Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования

В данном разделе определяем уровень затрат на выполнение каждой функции с использованием нормативного метода. Соответствующие расчеты функций приведены в таблице 20. Данная информация приведена с учетом средних затрат на выполнения функций.

Таблица 20 – Относительная значимость функций

Функция	Стоимость оборудования, тыс. руб.	Заработная плата, тыс. руб.	Себестоимость, тыс. руб.	Относительная себестоимость
Автоматизированная система	300	150	450	0,44
Программные средства	100	-	100	0,1
Аппаратные средства	200	-	200	0,2
Персонал	30	150	180	0,18
SCADA – система	50	35	85	0,08

3.3.5 Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и её анализ

Вся собранная в предыдущих разделах информация об объекте в данном разделе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (рисунок 24). Построенная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью функций и затратами на них.

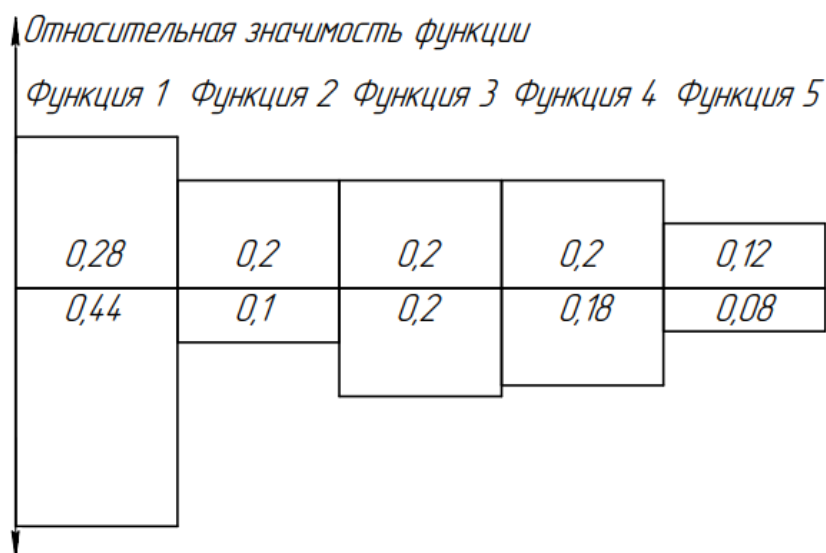


Рисунок 24 – Функционально-стоимостная диаграмма

Анализ полученной диаграммы (рисунок 24) показал, что рассогласования между затратами и значимостью каждой функции не обнаружено, следовательно, проведение работ по ликвидации диспропорций не требуется.

3.3.6 Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и её анализ

В качестве действий по оптимизации функций, выполняемых объектом, предложено следующее:

- оптимизация параметров надежности и безопасности;
- использование наиболее высокотехнологичного оборудования в автоматизированной системе для улучшения ее показателей;
- минимизация ошибок персонала путем использования микропроцессорных устройств во всем технологическом процессе.

3.4 Планирование научно-исследовательской работы

В рамках данного раздела необходимо выполнить следующие этапы:

- определить порядок работ в рамках исследования;
- определить исполнителей каждой работы;
- установить продолжительность всех работ; построить календарный план-график проведения НИИ.

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и инженер (И). Составим таблицу, содержащую перечень работ, основных исполнителей, продолжительность выполнения работ (таблица 21).

Таблица 21 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Содержание работ	№ раб	Исполнители	Продолжительность работ в днях
Составление технического задания	1	НР, И	3
Календарное планирование работ	2	НР, И	1
Обзор научной литературы	3	И	7
Проведение экспериментального исследования	4	И	20
Анализ результатов исследования	5	И	10
Анализ объекта автоматизации	6	И	5
Проектирование АСУ ТП	7	И	20
Разработка схем	8	И	15
Написание дополнительных разделов ВКР	9	И	15
Оформление итоговых материалов ВКР	10	И	5
Подготовка презентации	11	И	4
Согласование результатов	12	НР, И	4
Итого:			9
			109

По данным таблицы 21 построен календарный план-график проведения НТИ в виде диаграммы Ганта (таблица 22). На основании полученной диаграммы видно, что работы начинаются с 2 декады февраля и заканчиваются в последней декаде мая.

Таблица 22 – Календарный план-график проведения НИИ

№	Вид работ	Т _к , кал. дн.	Февраль		Март			Апрель			Май		
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление технического задания	3	■										
2	Календарное планирование работ	2	■										
3	Обзор научной литературы	6		■									
4	Проведение экспериментального исследования	20		■	■	■							
5	Анализ результатов исследования	10				■	■						
6	Анализ объекта автоматизации	5					■						
7	Проектирование АСУ ТП	20					■	■	■				
8	Разработка схем	15							■	■	■		
9	Написание дополнительных разделов ВКР	15									■	■	■
10	Оформление итоговых материалов ВКР	5										■	■
11	Подготовка презентации	4											■
12	Согласование результатов	4											■

НР – ; И ■ . ■

3.5 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- основная и дополнительная заработные платы участников исследования;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- затраты на оборудование.

3.5.1 Стоимость материальных затрат научно-технического исследования

К материальным затратам научно-технического исследования относятся: канцелярские принадлежности, покупные материалы и т.п. (таблица 23).

Таблица 23 – Материальные затраты

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы (З _м), руб.
Бумага для принтера, формат А4	пачка	1	530	530
Картридж для принтера	шт	1	1000	1000
Ручка	шт	2	30	60
Карандаш	шт	2	15	30
Итого:				1620

Итоговые затраты согласно таблице 23 составили 1620 рублей. Цены на все товары являются усредненными по г. Томску.

3.5.2 Заработная плата исполнителей

Под заработной платой понимается оплата труда всех участников исследования: инженера и научного руководителя). Расчет основной заработной платы осуществляется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Затраты на ЗП рассчитываются по формуле:

$$Z_{ЗП} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (14)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основная заработная плата определяется по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (15)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.; $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата определяется по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (16)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 рабочих дня $M = 11,2$ месяца, 5- дневная рабочая неделя и при отпуске в 48 рабочих дней $M = 10,4$ месяца, 6- дневная рабочая неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени технического персонала, раб. дн.

В таблице 24 представлен баланс рабочего времени для шестидневной рабочей недели.

Таблица 24 – Баланс рабочего времени для шестидневной рабочей недели

Показатели рабочего времени	Дни
Календарные дни	365
Количество нерабочих дней (выходные и праздничные дни)	119
Потери рабочего времени (отпуск, невыходы по болезни)	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	232

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (17)$$

где $З_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб.; $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент (равен 1,3 для г. Томска).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (17)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы.

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$З_{\text{м}} = 39300 \cdot 1,3 = 51090 \text{ руб.}; \quad (18)$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{51090 \cdot 10,4}{232} = 2290 \text{ руб.}; \quad (19)$$

$$З_{\text{осн}} = 2290 \cdot 9 = 20610 \text{ руб.}; \quad (20)$$

$$З_{\text{доп}} = 0,14 \cdot 20610 = 2885 \text{ руб.}; \quad (21)$$

$$З_{\text{зп}} = 20610 + 2885 = 23495 \text{ руб.} \quad (22)$$

Приведем расчет заработной платы для инженера:

$$З_{\text{м}} = 16300 \cdot 1,3 = 21190 \text{ руб.}; \quad (23)$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{21190 \cdot 10,4}{232} = 950 \text{ руб.}; \quad (24)$$

$$З_{\text{осн}} = 950 \cdot 109 = 103550 \text{ руб.}; \quad (25)$$

$$З_{\text{доп}} = 0,14 \cdot 103550 = 14497 \text{ руб.}; \quad (26)$$

$$З_{\text{зп}} = 103550 + 14497 = 118047 \text{ руб.} \quad (27)$$

Расчет заработной платы приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Расчет заработной платы

Исполнители	З _б , руб.	k _р	З _м , руб.	М	F _д	З _{дн} , руб.	T _р	З _{осн} , руб.	k _{доп}	З _{доп} , руб.	Ззп, руб.
НР	39 300	1,3	51 090	10,4	232	2 290	9	20 610	0,14	2 885	23 495
И	16 300	1,3	21 190	10,4	232	950	109	103 550	0,14	14 497	118 047
Итого:											141 542

Таким образом, суммарная заработная плата научного руководителя и инженера составляет 141 542 рублей.

3.5.3 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды определяем исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (28)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), равный 30,2%.

Результаты расчетов отчислений во внебюджетные фонды внесем в таблицу 26.

Таблица 26 – Отчисления в внебюджетные фонды

Исполнитель	Z _{внеб} , руб.
Научный руководитель	7 095
Инженер	35 650
Итого:	42 745

Сумма отчислений во внебюджетные фонды составляет 42 745 рублей.

3.5.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают дополнительные затраты организации, которые не попали в предыдущие статьи расходов, например печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, копирование материалов и т.д.

Накладные расходы составляют 20-25% от суммы основной и дополнительной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (C_{\text{ЗП}}^{\text{НР}} + C_{\text{ЗП}}^{\text{И}}), \quad (29)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Произведем расчет накладных расходов:

$$C_{\text{накл}} = 20\% \cdot (23495 + 118047) = 28308 \text{ руб.} \quad (30)$$

Накладные расходы составляют 28 308 рублей.

3.5.5 Затраты на оборудование

Смета составляется как на приобретение технологического оборудования, так и на строительные-монтажные работы. В таблице 27 представлена смета затрат на оборудование.

Таблица 27 – Затраты на оборудование

Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
Термопара, тип ХК с защитной гильзой	1	17000	17000
Нагреватели карбидокремниевые	7	5990	41930
Датчик давления	1	6100	6100
Спускной клапан	1	4680	4680
Материалы для изготовления корпуса термобарокамеры	1	150000	150000
Насос вакуумный масляный (TS-4L)	1	42770	42770
Насос для подачи масла 16 бар	1	44790	44790
ПЛК с модулями и необходимым оборудованием для шкафа автоматизации	1	250000	250000
Расходные материалы для резьбовых соединений	1	15000	15000
Теплоизоляция	1	30000	30000
Баллоны с азотом	4	15300	61200
Смотровые стекла	2	6800	13600
Итого:			677070

Стоимость оборудования составила $Z_{об} = 677070$ рублей.

Необходимо учесть затраты по доставке и монтажу приобретенного оборудования в размере 15% от его цены:

$$Z_{монт} = Z_{об} \cdot 15\% = 677070 \cdot 15\% = 101561 \text{ руб.} \quad (31)$$

Затраты на покупку оборудования, доставку и монтаж составят:

$$Z_{об.м.} = Z_{об} + Z_{монт} = 677070 + 99618 = 778630 \text{ руб.} \quad (32)$$

Таким образом, суммарные затраты на покупку, доставку и монтаж оборудования составляют 778630 рублей.

3.5.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. В таблице 28 сведены данные бюджета затрат.

Таблица 28 – Бюджет затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	1620
Заработная плата	141542
Отчисления во внебюджетные фонды	42745
Накладные расходы	28308
Затраты на оборудование	778630
Итого:	992845

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) и затраты на оборудование. Бюджет затрат составил 992845 рублей.

3.6 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального финансового показателя эффективности научного исследования, который рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (33)$$

где Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности аналога и разработки соответственно:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^a, \quad (34)$$

$$I_m^b = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^b. \quad (35)$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения работы.

Текущий проект – АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества. Данная система контроля имеет хороший потенциал, она конкурентоспособна, перспективна.

В таблице 29 приведен расчет показателя ресурсоэффективности.

Таблица 29 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	5	4
2. Простота в эксплуатации	0,2	5	4
3. Помехоустойчивость	0,15	4	4
4. Энергосбережение	0,2	5	3
5. Надежность	0,3	5	4
Итого:	1	4,8	3,65

$$I_m^p = 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 \quad (36)$$

$$= 4,85;$$

$$I_m^a = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 4 \quad (37)$$

$$= 3,8.$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{\text{финр}}^p$) и аналога ($I_{\text{финр}}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p}, \quad (38)$$

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a}. \quad (39)$$

Сравнительная эффективность проекта рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a}. \quad (40)$$

В таблице 30 представлена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 30 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
1	Интегральный финансовый показатель	0,97	1,00
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,85	3,8
3	Интегральный показатель эффективности	5,00	3,8
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,32	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с уже существующими аналогами по сжиганию традиционных топлив

3.7 Вывод по разделу

В рамках раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены следующие задачи:

- определены потенциальные потребители результатов исследования;
- произведен анализ конкурентных технических решений;
- выполнен FAST-анализ;
- составлен перечень работ и произведена оценка времени их выполнения;
- составлена сметы затрат на НИИ, затрат на оборудование, а также на монтажные работы;
- определена ресурсоэффективность проекта.

Общий бюджет разработки составил 992845 рублей, продолжительность работы составила 109 дней. Анализ затрат позволяет сделать вывод, что основными расходами в научно-исследовательской работе являются затраты на оборудование – 778630 рублей. Меньше всего средств уходит на материальные затраты НИИ – 1620 рублей.

Интегральный критерий ресурсоэффективности имеет высокий показатель (4,85 из 5), что свидетельствует об эффективности проекта.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
--------	-----

5БМ13		Разумов Дмитрий Сергеевич	
Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	И.Н.Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p>Объект исследования: Автоматизированная система управления измельчения капель композиционных жидких топлив; Область применения: Системы пожаротушения, дизельные двигатели, авиационные двигатели, технологии термической и огневой очистки жидкостей от загрязняющих их нерегламентированных примесей; Рабочая зона: лаборатория; Размеры помещения: 56 м²; Количество и наименование оборудования рабочей зоны: АРМ оператора, термобарокамера, система отвода отработавших газов, система подачи давления, система отвода давления, система нагрева газов, датчик температуры, датчик давления, высокоскоростная камера, прожектор, персональный компьютер.</p>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя; – ГОСТ 12.2.033-78 Рабочее место при выполнении работ стоя; – Трудовой кодекс РФ.
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<ul style="list-style-type: none"> – отклонение показателей микроклимата; – превышение уровня шума; – нарушение естественного света; – недостаточная освещенность; – опасность поражений эл. током; – повышенная температура воздуха; – подвижные части производственного оборудования либо движущиеся машины и механизмы; – вещества, обладающие свойствами химического воздействия на организм человека; – расчет искусственного освещения.
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Воздействие на литосферу и гидросферу: образования отходов при поломке оборудования и сжигания топлива; – Воздействие на атмосферу: антропогенные выбросы при горении топлива.
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Возможные ЧС: поражение электрическим током, возгорание;

	– Наиболее типичная ЧС: возгорание.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ13	Разумов Дмитрий Сергеевич		

4 Социальная ответственность

К вопросам социальной ответственности в лабораторных условиях относятся: правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности; профессиональная социальная безопасность; экологическая безопасность и безопасность в чрезвычайных ситуациях.

В выпускной квалификационной работе была разработана и спроектирована автоматизированная система управления технологическим процессом микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества.

Использование автоматизированной системы управления позволяет сократить число персонала и минимизировать нагрузку на них, оперативно следить за процессом и своевременно задавать необходимые настройки для проведения экспериментальных исследований. Для обеспечения работоспособности системы необходимо присутствие человека – оператора, который будет проводить экспериментальные исследования за установкой, вносить поправки в настройки системы, обеспечивать непрерывную и эффективную работу стенда, а также контролировать корректность работы технологического оборудования. Предполагается, что данная система будет устанавливаться в лаборатории для проведения научных исследований.

В связи с особенностью работы, важными факторами при работе оператора будут являться: микроклимат помещения, освещение, шум, электромагнитное излучение, рабочая поза. Также необходимо рассматривать факторы, влияющие на электробезопасность и пожарную безопасность, и рассмотреть вопросы ее организации на производстве.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Вопросы по организации и охране труда в отношении работника регламентируются согласно Трудового кодекса РФ [70]. Согласно трудовому кодексу, регламентируются вопросы касаются режима рабочего времени, нормирование и оплата труда.

Существуют принятые нормы в области охраны труда: на первом месте жизнь и здоровье работника, а потом уже результат производственной, интеллектуальной или научной деятельности; единые нормативные требования по охране труда; защита интересов работников, пострадавших в результате несчастных случаев [ГОСТ 12.0.004-2015 [71]].

4.1.2 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Оператор в лаборатории обязан проходить инструктаж по технике безопасности раз в 3 месяца, так же соблюдать правила пожарной безопасности и не оставлять оборудование без присмотра.

Предприятие или высшее учебное заведение, к которому относится лаборатория, должно обеспечить оператора спецодеждой, спец-обувью и другими средствами защиты, например, средства индивидуальной защиты дыхательных путей. Оператор должен немедленно остановить работу лабораторного стенда во всех аварийных случаях при превышении установок по температуре и давлению в термобарокамере. По окончании работы оператор должен сдать дежурство, сделав отметку в журнале.

4.1.3 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Основным объектом для оператора в лаборатории является рабочее место, представляющее собой в общем случае пространство, в котором он может находиться при выполнении производственного процесса. Выполняя планировку рабочего места, необходимо учитывать следующее:

- проход вокруг рабочего стола должен составлять не менее 500 мм;
- расположение экрана монитора должно быть от глаз пользователя на расстоянии примерно равным от 600 до 700 мм, но не ближе чем 500 мм;
- окраска корпуса ПК должна быть выполнена в спокойных нейтральных тонах;

– корпус ПК, клавиатура и другие блоки ПК должны обладать матовой поверхностью и не иметь блестящих деталей, которые могут создавать блики и мешать работе персонала;

– конструкция рабочего стола должна обладать удобной рабочей поверхностью и необходимым количеством места для монтажа оборудования;

– все электрооборудование необходимо размещать на оптимальном расстоянии от мест, в которых возможен прямой контакт оборудования с водой (раковины, открытые емкости с водой).

4.2 Производственная безопасность

Профессиональная социальная безопасность – система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих или уменьшающих вероятность воздействия на работающих опасных травмирующих факторов, возникающих в рабочей зоне в процессе трудовой деятельности.

К работе с экспериментальным стендом с использованием термобарокамеры допускаются лица, обученные правилам техники безопасности и изучившие инструкцию по работе с лабораторным стендом.

4.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов

При выборе факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-2015 [72]. Перечень вредных и опасных факторов, наиболее характерных для проектируемой системы представлен в таблице 30.

Таблица 31 – Вредные и опасные фактора при работе оператора автоматизированной системы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96 [4]. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
2. Превышение уровня шума		+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ [5]. Шум.
3. Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	Общие требования безопасности. Естественное и искусственное освещение.
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*[6]. Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 [7].
5. Опасность поражений электрическим током	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ [8]. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
6. Повышенная температура воздуха		+	+	ГОСТ Р 30331.4-95 [9]. Защита от тепловых воздействий.
7. Подвижные части производственного оборудования		+	+	ГОСТ Р 56257-2014 [10] Характеристика факторов внешнего природного воздействия. Общая классификация
8. Вещества, обладающие свойствами химического воздействия на организм человека			+	ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарногигиенические требования к воздуху рабочей зоны [11]

4.2.1.1 Отклонение показателей микроклимата

Находясь на рабочем месте в помещении лаборатории человек подвержен влиянию определённых метеоусловий, или микроклимату рабочих помещений. Окружающая среда влияет на тепловое состояние организма. Основными параметрами микроклимата являются действующими на организм человека температура, влажность и скорость движения воздуха, а также температура окружающих поверхностей [79]. При работе с лабораторным стендом персонал в основном будет задействован работой с ПК. Работа на ПК в офисном помещении относится к классу легких работ с энергозатратами 150 ккал/час, т.е. к классу работ Ib. Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [73] оптимальные параметры микроклимата должны соответствовать данным таблицы 32:

Таблица 32 – Нормативные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21-23	60-40	<0,1
Теплый	22-24	60-40	<0,1

Параметры микроклимата регулируются системой центрального отопления и вентиляцией [79]. Также для поддержания нормального микроклимата необходимо ежедневно проводить влажную уборку и проветривание помещения, а также поддерживать определённый уровень температуры. Согласно, приведённым выше данным, данное помещение удовлетворяет условиям микроклимата.

4.2.1.2 Превышение уровня шума

Одним из методов уменьшения воздействия шума в лаборатории является снижение или ослабление шума в его источниках – генераторы, электрические машины, вентиляторы, двигатели. Ненормальный повышенный

шум, создаваемый электрическими машинами и двигателями, часто бывает по причине неплотных соединений элементов. Своевременное устранение этих причин позволяет снизить уровень шума. В качестве индивидуальных средств защиты от шума используют специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения шума. Также при наличии шума необходимо использовать материалы, имеющие хорошие звукопоглощающие свойства (применять звукоизоляцию). Стены могут быть покрыты звукопоглощающим материалом. В таблице 33 приведены допустимые уровни шума (ГОСТ 12.1.003-2014 [74]).

Таблица 33 – Допустимые уровни шума

Рабочие места	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Уровни звука и эквивалентные уровни звука, по дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
ОРУ	99	92	86	83	80	78	76	85

4.2.1.3 Отсутствие или недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны

Рациональное освещение имеет большое значение в процессе эксплуатации двигательной установки в лабораторных условиях. Освещение должно быть таким, чтобы работающий персонал мог без напряжения зрения выполнять свою работу. Неудовлетворительное освещение может исказить информацию, а также утомляет зрение и вызывает утомление всего организма в целом. Применяют два вида освещения: естественное и искусственное. При недостаточном естественном освещении помещения необходимо использовать искусственные источники света. Так как неудовлетворительная освещённость, как говорилось ранее, ухудшает зрение, вызывает общее

утомление и даже может явиться причиной травматизма. В таблице 34 приведены нормы освещенности лаборатории [75].

Таблица 34 – Нормы освещенности открытых участков лаборатории

Освещаемые объекты	Средняя освещенность E_{cp} , лк, не менее
Лаборатории органической и неорганической химии, термические, физические, спектрографические, стилometric, фотометрические, микроскопные, рентгеноструктурного анализа, механические и радиоизмерительные, электронных устройств, препаративные.	400

4.2.1.4 Расчет искусственного освещения

В качестве исходных данных будет использовано помещение лаборатории (рисунок 25), имеющее следующие размеры: длина 8 м (А), ширина 7 м (В), высота 3 м (Н). Высота рабочей поверхности $h_{pp} = 0,7$ м. Согласно СНиП 23-05-95* [75], требуется создать освещенность $E_H = 400$ Лк для системы общего освещения. Коэффициент отражения свежепобеленных стен $R_c = 70\%$, потолка $R_{п} = 50\%$.

Произведем расчет системы общего люминесцентного освещения.

Выбираем светильник типа ОД-2-80, имеющий 2 лампы, мощность 80 Вт, $\lambda = 1,4$, длину $l_{cb} = 1521$ мм и ширину $b_{cb} = 266$ мм.

На рисунке 26 показано размещение светильников в помещении.

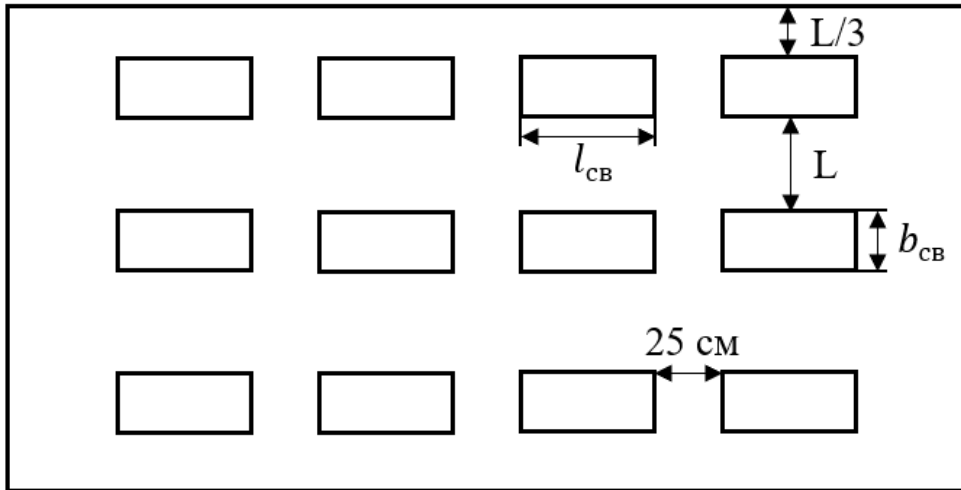


Рисунок 25 – Схема размещения светильников в помещении для люминесцентных ламп

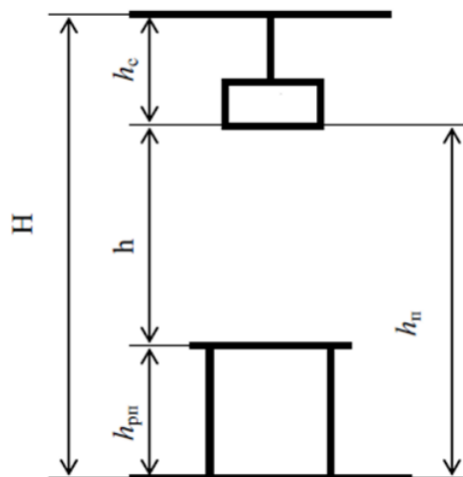


Рисунок 26 – Условное изображение допустимых расстояний между оборудованием

Высота подвеса светильника определяется по формуле:

$$h_{пн} = H - h_c, \quad (41)$$

где h_c – расстояние светильников от перекрытия (свес), м.

Примем $h_c = 0,4$ м:

$$h_{пн} = 3 - 0,4 = 2,6 \text{ м.} \quad (42)$$

Полученное значение высоты подвеса является допустимым для принятого типа светильника.

Высота светильника над рабочей поверхностью находится по формуле:

$$h = h_{\text{п}} - h_{\text{рп}} = 2,6 - 0,7 = 1,9 \text{ м.} \quad (43)$$

Расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 1,9 = 2,66 \text{ м.} \quad (44)$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,66}{3} = 0,89 \text{ м.} \quad (45)$$

Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{B - \frac{2}{3} \cdot L}{L} + 1 = \frac{7 - \frac{2}{3} \cdot 2,66}{2,66} + 1 \approx 3. \quad (46)$$

Количество светильников в ряду определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{A - \frac{2}{3} \cdot L}{l_{\text{св}} + 0,5} = \frac{8 - \frac{2}{3} \cdot 2,66}{1,521 + 0,5} \approx 3. \quad (47)$$

Размещаем светильники в три ряда, в каждом ряду 3 светильника. Учитывая, что в светильнике установлено 2 лампы, общее количество ламп составляет:

$$N_{\text{л}} = n_{\text{ряд}} \cdot n_{\text{св}} \cdot 2 = 3 \cdot 3 \cdot 2 = 18. \quad (48)$$

Индекс помещения находится по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 7}{1,9 \cdot (8 + 7)} = 1,96 \approx 2 \quad (49)$$

Тогда коэффициент использования светового потока составляет:

$$\eta = 60\%. \quad (50)$$

Световой поток лампы определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_{\text{н}} \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N_{\text{л}} \cdot \eta}, \quad (51)$$

где K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, равный 1,5; Z – коэффициент неравномерности освещения (для люминесцентных ламп принимается равным 1,1).

Тогда световой поток лампы составляет:

$$\Phi = \frac{400 \cdot 8 \cdot 7 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{18 \cdot 60\%} = 3422 \text{ Лм.} \quad (52)$$

Выбираем ближайшую стандартную лампу, соответствующую значению светового потока – лампа ЛД мощностью $P_{\text{л}} = 65$ Вт и с потоком 3750 Лм.

Проверяем выполнение условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\%; \quad (53)$$

$$-10\% \leq \frac{3750 - 3422}{3750} \cdot 100\% \leq +20\%; \quad (54)$$

$$-10\% \leq 8,7\% \leq +20\% - \text{входит в диапазон.} \quad (55)$$

Определим электрическую мощность всей осветительной системы:

$$P = P_{\text{л}} \cdot N_{\text{л}} = 65 \cdot 18 = 1170 \text{ Вт.} \quad (56)$$

4.2.1.5 Опасность поражений электрическим током

Наибольшую опасность в помещении лаборатории может представлять поражение человека электрическим током вследствие замыкания электрической цепи через тело человека, т. е. при прикосновении человека к сети не менее чем в двух точках. В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. «Правила устройства электроустановок» [81] делят все помещения на помещения с повышенной опасностью, особо опасные помещения, помещения без повышенной опасности. Согласно ГОСТ 12.1.013-

78. Помещение лаборатории с термобарокамерой можно классифицировать как помещение с повышенной опасностью поражения человека электрическим током [77]. Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях: при прикосновении к токоведущим частям во время ремонта; при однофазном (однополюсном) прикосновении незаземленного от земли человека к незаземленным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением; при прикосновении к незаземленным частям, находящимся под напряжением, то есть в случае нарушения изоляции; при соприкосновении с полом и стенами, оказавшимися под напряжением.

Меры обеспечения безопасности эксплуатации электроустановок [77]: каждый работающий проходит вводный инструктаж на рабочем месте и расписывается в том, что он ознакомлен с инструкцией по технике безопасности; отключение напряжения с токоведущих частей, на которых должна быть проведена работа, и принятие мер, в результате которых становится невозможна подача напряжения к месту работы; проверка отсутствия напряжения на участке работ и наложение на токоведущие части временного заземления; вывешивание плакатов, указывающих место работы; пользователю не разрешается разбирать оборудование, работать в верхней одежде.

Безопасность при работе с электроустановками обеспечивается применением различных технических и организационных мер. Для обеспечения безопасности применяются технические средства защиты от поражения электрическим током, такие как изоляция токопроводящих частей (проводов); установка ограждающих устройств; предупредительная сигнализация и блокировки; защитное заземление; зануление; защитное отключение. Для участка персональных компьютеров наиболее приемлемым вариантом является защитное заземление, т. к. корпуса компьютеров и периферии обычно выполнены из токопроводящих материалов, а также имеются специальные клеммы для подключения заземления. Все

электрооборудование, расположенное на рабочем месте, включая компьютер, было заземлено через нулевой провод.

4.2.1.6 Повышенная температура воздуха

Во время работы с термобарокамерой некоторые части оборудования сильно нагреваются, особенно части корпуса камеры. Неосторожное обращение с нагретым оборудованием может привести к ожогам. Согласно ГОСТ Р 30331.4-95 [78], мерами предосторожности являются при работе с нагревающимся оборудованием: не прикасайтесь к нагретым частям оборудования во время его работы (или после завершения работы при остывании); соблюдайте осторожность при работе с исследуемыми нагретыми образцами; выполняйте все работы по обслуживанию и чистке оборудования только при полностью отключенном от сети питания оборудовании и после остывания нагретых частей; используйте специальные рукавицы для защиты рук от ожогов и специальную одежду.

4.2.1.7 Подвижные части производственного оборудования

Существует опасность получения травмы подвижными элементами двигательной установки. Перед включением двигательной установки следует убедиться в отсутствии каких-либо препятствий на пути движущихся частей. Согласно ГОСТ Р 56257-2014 [79], мерами предосторожности являются: при эксплуатации двигателя необходимо соблюдать все общие правила техники безопасности работы с механизмами; запрещается эксплуатация двигателя при обнаружении неисправностей в работе механических или электрических компонентов. Продолжать работу разрешается только после устранения причин неисправностей специалистами; при эксплуатации необходимо следить за чистотой всех механизмов двигателя, периодически очищать их от пыли и грязи. Обтирочные материалы, которыми очищается модуль, не должны оставлять следов и ворса на протираемых поверхностях.

4.2.1.8 Вещества, обладающие свойствами химического воздействия на организм человека

Термобарокамера с микро-взрывной фрагментацией капель топлив представляет опасность, как и двигательные установки на привычных видах топлив, таких как дизельное топливо. Опасными факторами при использовании дизельного двигателя: является наличие вредных выбросов, как в атмосферу, так и в помещении, где установлен агрегат, а также высокая степень пожарной и взрывной опасности. Для уменьшения количества концентрации выбросов проводят следующие профилактические мероприятия: установка очистительного оборудования для выхлопных газов, герметизация технологических отверстий дизельного двигателя, добавление дополнительных составляющих топлива, способствующих снижению концентраций выбросов. Для уменьшения загазованности в помещении устанавливается вытяжная система. Помещение оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией с нижним и верхним отсосом, обеспечивающей равномерный приток свежего воздуха и удаление загрязненного. Приточно-вытяжная вентиляция в помещении работает постоянно.

4.3 Экологическая безопасность

Загрязнение (окружающей среды, природной среды, биосферы) – это привнесение в окружающую среду или возникновение в ней новых, обычно не характерных физических, химических или биологических агентов (загрязнителей), или превышение их естественного среднесуточного уровня в различных средах, приводящее к негативным воздействиям.

4.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Выбросы загрязняющих веществ двигательной установки, обусловленные процессами сгорания органического топлива, являются одним из основных источников загрязнения атмосферы. Объемы вредных выбросов связаны с качеством и количеством сжигаемого топлива, полнотой его

использования, а также эффективностью в целом работы двигателя. Наибольшую опасность для биосферы и для здоровья человека представляют установки, не имеющие средств очистки от вредных выбросов.

4.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Для снижения количества вредных выбросов необходимо контролировать расход окислителя в термобарокамере, поскольку при его нехватке, возникает большой недожог топлива, что приводит к увеличению количества отходов. А при избытке воздуха образуются оксиды азота. Также важным аспектом является регулирование температуры в камере сгорания, поскольку от данного параметра зависит количество вредных выбросов. Уменьшить количество вредных выбросов возможно путем внедрения в систему управления двигательной установкой управляющих и регулирующих органов по температуре и расходу окислителей. Информация о значениях температуры и расхода воздуха приходит на регуляторы через соответствующие датчики. Также в качестве средств для борьбы с вредными выбросами используются уловители и нейтрализаторы вредных веществ.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь или повлекла за собой человеческие смерти, а также ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. В настоящее время основными способами защиты населения, в том числе и производственного персонала, являются: – укрытие в защитных сооружениях; – проведение эвакуационных мероприятий; – использование средств индивидуальной защиты. При работе лабораторного стенда могут возникнуть некоторые чрезвычайные ситуации. Например, воспламенение

лаборатории и прилегающей к ней территории. Опасность представляет емкость хранения топлива.

4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

В лаборатории с термобарокамерой наибольшую опасность представляет возникновение возгорания. Поскольку, во-первых, топливо необходимо складировать (есть риск его воспламенения), во-вторых, сжигание топлива происходит при высоких температурах в камере сгорания. При эксплуатации необходимо контролировать состояние канистр с топливом путем внешнего осмотра и измерения температуры в помещении. Признаками самовозгорания являются повышение температуры, наличие пятен утечек топлива. Если появились признаки самовозгорания топлива, то необходимо устранить эти проблемы. Для устранения этих проблем применяются специальные огнетушащие составы для борьбы с воспламенением горючих веществ. Самой распространенной причиной возникновения пожара является нарушение противопожарных правил.

Также, причиной возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с возгоранием помещения, может послужить короткое замыкание в проводке. Поэтому, для предотвращения возгорания помещение должно быть оборудовано средствами пожаротушения (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с противопожарным инвентарем), средствами связи. Для предотвращения возгорания на объекте предусмотрена автоматизированная система пожаротушения.

4.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

В качестве мероприятий по предотвращению ЧС были проведены следующие противопожарные мероприятия: помещение было оборудовано: средствами тушения пожара (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с

противопожарным инвентарем); средствами связи; проверена исправность электрической проводки осветительных приборов и электрооборудования; персонал знает место нахождения средств пожаротушения и средств связи; помнит номера телефонов для сообщения о пожаре; умеет пользоваться средствами пожаротушения. Функционирует автоматическая система тушения пожаров. Для тушения пожаров в помещении с компьютерами присутствуют углекислотные и порошковые огнетушители, которые обладают высокой скоростью тушения, большим временем действия, возможностью тушения электроустановок, высокой эффективностью борьбы с огнем. В лаборатории, в которой выполнялась работа, имеется пенный и углекислотный огнетушители.

4.5 Выводы по разделу

В результате разработки данного раздела были достигнуты следующие задачи:

- в работе рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, указаны специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства, а также организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны;
- рассмотрена профессиональная социальная безопасность;
- выявлены и описаны вредные и опасные факторы, возникающие в лаборатории с двигательной установкой;
- указаны методики и средства борьбы с вредными и опасными факторами;
- рассмотрена экологическая безопасность;
- описаны возможные ЧС и меры по их предупреждению и оповещению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках магистерской диссертации в результате экспериментальных исследований были установлены характерные режимы существования при нагреве двухжидкостных капель: образование и рост пузырьков внутри капли, диспергирование, микро-взрыв, получены зависимости времени существования капли, времени задержки распада капли от температуры внешней газовой среды в диапазоне от 350 °С до 450 °С, а также выделены перспективные механизмы управления характеристиками распада капель за счет размещения в них готовых центров парообразования различного происхождения и выдержки определенного температурного режима.

Была разработана АСУ микро-взрывного измельчения капель композиционных жидких топлив с применением воды разного качества, разработана вся необходимая проектная документация.

Была написана программа с базой данных для оператора с целью облегчения проведения и обработки результатов экспериментальных исследований.

Были выполнены разделы «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Плетнев Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций. – М.: Энергия, 1985. – 340 с.
2. Андык В.С. Автоматизация технологических процессов на ТЭС. Учебное пособие к практическим занятиям. - Томск: Изд. ТПУ, 1999-84 с.
3. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Applied Thermal Engineering. – 2020.
4. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // International Journal of Thermal Sciences. – 2019.
5. Кац М.Д. Расчет системы автоматического регулирования температуры перегретого пара парогенератора. Методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине "Автоматизация технологических процессов на ТЭС" для студентов специальности 220301 "Автоматизация технологических процессов и производств". – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 38 с.
6. Verkhovskaya, E. Petrov, A. Verkhovskiy, Manufacturing the Technology of Xenon-Containing Drinking Water and its Influence on Some Psychophysiological Characteristics of Man, in: MATEC Web Conf., 2016. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167901058>.
7. R. Kumar, A.K. Thakur, P. Chaudhari, N. Banerjee, Particle Size Reduction Techniques of Pharmaceutical Compounds for the Enhancement of Their Dissolution Rate and Bioavailability, J. Pharm. Innov. (2021). <https://doi.org/10.1007/s12247-020-09530-5>.
8. J. Haarhoff, J.K. Edzwald, Adapting dissolved air flotation for the clarification of seawater, Desalination. 311 (2013) 90–94. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2012.10.035>.

9. K.S. Creamer, Y. Chen, C.M. Williams, J.J. Cheng, Stable thermophilic anaerobic digestion of dissolved air flotation (DAF) sludge by co-digestion with swine manure, *Bioresour. Technol.* 101 (2010) 3020–3024. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.12.029>.
10. S. Yoo, J.S. Hsieh, Advanced water recycling through electrochemical treatment of effluent from dissolved air flotation unit of food processing industry, 2010. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.802>.
11. R.T. Rodrigues, J. Rubio, DAF–dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry, *Int. J. Miner. Process.* 82 (2007) 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2006.07.019>.
12. M.R. Aliff Radzuan, M.A. Abia-Biteo Belope, R.B. Thorpe, Removal of fine oil droplets from oil-in-water mixtures by dissolved air flotation, *Chem. Eng. Res. Des.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.09.013>.
13. D. Riestenberg, E. Chiu, M. Gborigi, L. Liang, O.R. West, C. Tsouris, Investigation of jet breakup and droplet size distribution of liquid CO₂ and water systems - Implications for CO₂ hydrate formation for ocean carbon sequestration, *Am. Mineral.* 89 (2004) 1240–1246. <https://doi.org/10.2138/am-2004-8-911>.
14. J.A. Widegren, T.J. Bruno, Vapor pressure measurements on saturated biodiesel fuel esters by the concatenated gas saturation method, *Fuel.* 90 (2011) 1833–1839. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.11.034>.
15. M.S. Kumar, J. Bellettre, M. Tazerout, The use of biofuel emulsions as fuel for diesel engines: A review, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy.* 223 (2009) 729–742. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE758>.
16. D. Tarlet, J. Bellettre, M. Tazerout, C. Rahmouni, Formulation and combustion of emulsified fuel: The changes in emission of carbonaceous residue, *Int. J. Energy Res.* 34 (2010) 688–694. <https://doi.org/10.1002/er.1580>.

17. J. Shinjo, J. Xia, L.C. Ganippa, A. Megaritis, Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets, *Phys. Fluids*. (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4897918>.
18. I. Nowrouzi, A.K. Manshad, A.H. Mohammadi, Effects of dissolved carbon dioxide and ions in water on the dynamic interfacial tension of water and oil in the process of carbonated smart water injection into oil reservoirs, *Fuel*. 243 (2019) 569–578. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.069>.
19. P.P. Tkachenko, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, Collisions of water droplets in the high-temperature air, *Int. J. Heat Mass Transf.* 170 (2021) 121011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121011>.
20. W. Gao, Q. Qi, J. Zhang, G. Chen, D. Wu, An experimental study on explosive boiling of superheated droplets in vacuum spray flash evaporation, *Int. J. Heat Mass Transf.* 144 (2019) 118552. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2019.118552>.
21. Y. Solomatin, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, Atomization of promising multicomponent fuel droplets by their collisions, *Fuel*. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115751>.
22. H. Watanabe, T. Harada, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura, The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel, *Int. J. Heat Mass Transf.* (2009). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.033>.
23. Y. Suzuki, T. Harada, M. Shoji, H. Watanabe, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura, Visualization of Internal Behavior in Emulsified Fuel Droplets and the Effect of Surfactant on Secondary Atomization, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*. 36 (2010) 557–565. <https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.36.557>.
24. Y. Suzuki, T. Harada, H. Watanabe, M. Shoji, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura, Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets, *Proc. Combust. Inst.* (2011). <https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.05.115>.

25. E.A. Melo-Espinosa, J. Bellettre, D. Tarlet, A. Montillet, R. Piloto-Rodríguez, S. Verhelst, Experimental investigation of emulsified fuels produced with a micro-channel emulsifier: Puffing and micro-explosion analyses, *Fuel*. 219 (2018) 320–330. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2018.01.103>.
26. P.A. Strizhak, M. V. Piskunov, R.S. Volkov, J.C. Legros, Evaporation, boiling and explosive breakup of oil–water emulsion drops under intense radiant heating, *Chem. Eng. Res. Des.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.09.008>.
27. L. Marchitto, R. Calabria, C. Tornatore, J. Bellettre, P. Massoli, A. Montillet, G. Valentino, Optical investigations in a CI engine fueled with water in diesel emulsion produced through microchannels, *Exp. Therm. Fluid Sci.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.008>.
28. M. Mezhericher, I. Ladizhensky, I. Etlin, Atomization of liquids by disintegrating thin liquid films using gas jets, *Int. J. Multiph. Flow*. 88 (2017) 99–115. <https://doi.org/10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2016.07.015>.
29. M. Mezhericher, I. Ladizhensky, I. Etlin, Liquid atomization method and Device, wo2016/055993, 2015.
30. D. Tarlet, C. Allouis, J. Bellettre, The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion, *Int. J. Therm. Sci.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.04.008>.
31. D. Tarlet, E. Mura, C. Josset, J. Bellettre, C. Allouis, P. Massoli, Distribution of thermal energy of child-droplets issued from an optimal micro-explosion, *Int. J. Heat Mass Transf.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.054>.
32. S.S. Sazhin, O. Rybdylova, C. Crua, M. Heikal, M.A. Ismael, Z. Nissar, A.R.B.A. Aziz, A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets, *Int. J. Heat Mass Transf.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.065>.
33. R.S. Volkov, P.A. Strizhak, Using Planar Laser Induced Fluorescence to explore the mechanism of the explosive disintegration of water emulsion droplets

exposed to intense heating, *Int. J. Therm. Sci.* (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.01.027>.

34. S. Fostiropoulos, G. Strotos, N. Nikolopoulos, M. Gavaises, Numerical investigation of heavy fuel oil droplet breakup enhancement with water emulsions, *Fuel*. 278 (2020) 118381. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118381>.

35. S. Fostiropoulos, G. Strotos, N. Nikolopoulos, M. Gavaises, A simple model for breakup time prediction of water-heavy fuel oil emulsion droplets, *Int. J. Heat Mass Transf.* (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120581>

36. N. Shlegel, P. Strizhak, D. Tarlet, J. Bellettre, Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104329>.

37. D. V. Antonov, P.A. Strizhak, Heating, evaporation, fragmentation, and breakup of multi-component liquid droplets when heated in air flow, *Chem. Eng. Res. Des.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.03.037>.

38. D. V. Antonov, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, Secondary atomization of gas-saturated liquid droplets as a result of their collisions and micro-explosion, *Chem. Eng. Res. Des.* 162 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.08.011>.

39. D. V. Antonov, G. V. Kuznetsov, S.S. Sazhin, P.A. Strizhak, Puffing/micro-explosion in droplets of rapeseed oil with coal micro-particles and water, *Fuel*. 316 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123009>.

40. D. V. Antonov, P.A. Strizhak, R.M. Fedorenko, Z. Nissar, S.S. Sazhin, Puffing/micro-explosion in rapeseed oil/water droplets: The effects of coal micro-particles in water, *Fuel*. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119814>.

41. C. Yaws, L. Yaws' handbook of thermodynamic and physical properties of chemical compounds, Knovel. (2003).

42. D. V. Antonov, G. V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets,

emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium, *Acta Astronaut.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.04.048>.

43. D. V. Antonov, G. V. Kuznetsov, S.Y. Misyura, P.A. Strizhak, Temperature and convection velocities in two-component liquid droplet until micro-explosion, *Exp. Therm. Fluid Sci.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109862>.

44. S.S. Sazhin, T. Bar-Kohany, Z. Nissar, D. Antonov, P.A. Strizhak, O.D. Rybdylova, A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets, *Int. J. Heat Mass Transf.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120238>

45. П.А. Стрижак [Лекция]. – Экспериментальное исследование теплофизических и газодинамических процессов. Измерение уровня, плотности, концентрации, дисперсности. Режим доступа: https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PAVELSPA/Study/Tab1/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F_4.pdf/, свободный. – Загл. с экрана.

46. Волошенко А. В., Горбунов Д. Б. Проектирование функциональных схем систем автоматического контроля и регулирования: учебное пособие//Томск: Изд-во ТПУ. – 2008. – 108 с.

47. ООО «ОВЕН» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://owen.ru/catalog>, свободный. – Загл. с экрана.

48. ООО «Метран» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.emerson.ru/ru-ru/catalog>, свободный. – Загл. с экрана

49. ООО «РИДАН» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ridan.ru/preobrazovатели-davleniya/catalog>, свободный. – Загл. с экрана

50. АО «ВИКА» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.wika.ru/products_ru_ru.WIKA, свободный. – Загл. с экрана.

51. ЗАО «РОСМА» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosma.spb.ru/datchiki/datchiki-davleniya-izmeritelnye-rpd/>, свободный. – Загл. с экрана.
52. ООО «ХОЛОДПРОМСЕРВИС» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://holodps.spb.ru/catalog/refrigerating-oils/pumps-for-replacement/01624.html>, свободный. – Загл. с экрана.
53. "YonJou" Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.yonjou-pump.com/centrifugal-pump/oil-pump/high-temperature-oil-pump.html>, свободный. – Загл. с экрана.
54. "ФИНОМАНИЯ" Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://finomania.ru/avto-moto-tovary-avtoservis/tovary-dlya-avtoservisa/instrumenty-dlya-remonta/maslianyi-nasos-22l-min-16-bar-230-v-mot-70-01416>, свободный. – Загл. с экрана.
55. ООО "ПитерЛаб" Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.piterlab.ru/goods/195836739-uv_2004_nasos_vakuumny_maslyany_ts_4l_ulab. – Загл. с экрана.
56. ООО «УЛАВ» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ulabrus.ru/katalog_tovarov1/obwelaboratornoe_oborudovanie/nasosy_vakuumnye, свободный. – Загл. с экрана.
57. «Pe-Lab». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pe-lab.ru/catalog/obshchelaboratornoe_oborudovanie/nasosy_vakuumnye/. – Загл. с экрана.
58. АО "ЭКСИС" Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eksis.ru/catalog>. – Загл. с экрана.
59. ООО «Приборы контроля и привод» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kip59.ru/catalog/>, свободный. – Загл. с экрана.

60. Газоанализаторы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gazoanalizators.ru/catalog/>. – Загл. с экрана.
61. Волошенко А. В., Горбунов Д. Б. Проектирование функциональных схем систем автоматического контроля и регулирования: учебное пособие//Томск: Изд-во ТПУ. – 2008. – 108 с.
62. Приводы Siemens. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aviteksbt.ru/catalog/privody_siemens/, свободный. – Загл. с экрана.
63. Программируемый логический контроллер ЭЛСИ-ТМК. Каталог продукции. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elesy.ru/products/products/plc.aspx>, свободный. – Загл. с экрана.
64. Siemens S7-200 Программируемый контроллер. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.siemens-pro.ru/components/s7-200.htm>, свободный. – Загл. с экрана.
65. Принципиальные электрические схемы средств автоматизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studopedia.ru/10_114033_printsipialnie-elektricheskie-shemi-sredstv-avtomatizatsii.html, свободный. – Загл. с экрана.
66. Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам. ГОСТ 2.109-73. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200001992>, – Загл. с экрана.
67. Ключев А.С., Глазов Б.В. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
68. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справочное пособие / А. С. Ключев, Б. В. Глазов, А. Х. Дубровский, А. А. Ключев; Под ред. А. С. Ключева. – 2-е издание, переработанное и дополненное – Москва: Энергоатомиздат, 1990. — 464 с.
69. Гаврикова Н.А., Тухватулина Л.Р., Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Шаповалова Н.В. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и 114

ресурсосбережение: учебно-методическое пособие; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

70. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (р. от 27.12.2018). – М.; Москва, Кремль: Изд. Российская газета, 2018. – 215 с.

71. ГОСТ 12.0.004-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136072>. – Загл. с экрана.

72. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136071>. – Загл. с экрана.

73. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901704046>. – Загл. с экрана.

74. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118606>. – Загл. с экрана.

75. СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001026>. – Загл. с экрана.

76. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054197>. – Загл. с экрана.

77. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200313>. – Загл. с экрана.

78. ГОСТ 30331.4-95 (МЭК 364-4-42-80). Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от тепловых воздействий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001338>. – Загл. с экрана.

79. ГОСТ Р 56257-2014. Характеристика факторов внешнего природного воздействия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118630>. – Загл. с экрана.

80. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608>. – Загл. с экрана.

81. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР, 6-е издание – Энергоатомиздат, 1996. – 640 с.

Приложение I

Researches of fragmentation of droplets of coal-water slurries containing petrochemicals under different heating methods

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ13	Разумов Дмитрий Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Гончарова Любовь Анатольевна	к.п.н.		

Introduction

Gas-saturated liquids are popular in many industries. The scientific community is busy developing new methods of dissolving different gases in liquids to improve production performance [1,2]. In particular, dissolved gas flotation is used in the pharmaceutical industry to reduce the size of pharmaceutical compounds, to accelerate their dissolution, and to enhance their bioavailability [2]. Xenon is dissolved in water, oils, and emulsions to provide the required medical and biological properties, while nitrogen is dissolved in plant-based oils to prolong their shelf life [3]. The main advantage of this method over spray drying is the low critical temperature of carbon dioxide. Dissolved air flotation is often used in water and wastewater treatment plants to purify water before supplying it to households and commercial facilities [4], in agriculture [5], food [6], mining [7] and oil processing [8] industries. Flotation is possible due to the presence of gas bubbles in liquid (mostly water) [9]. The impurities suspended in such CO₂-saturated liquid ascend together with bubbles to the surface of liquid films and droplets [9] to later detach themselves from the main volume of the liquid. Gas-saturated liquids play a pivotal role in fuel technologies. Components of the fuel-air mixture of both the oxidizer and the fuel are saturated by neutral gases (most often nitrogen) to ensure the stable pressure in the tanks with varying ambient temperature [9]. Adding oxygen-containing components, such as methanol, dimethyl carbonate, and diethyl ether to biofuel for diesel engines reduces the concentrations of the emitted solid particles and NO_x [10]. Adding water to fuel oil also reduces the anthropogenic emissions from its combustion due to the micro-explosive breakup triggered by fast water boiling within the emulsion and the destruction of the parent droplet [11]. Micro-explosive breakup is used to intensify the secondary atomization of droplets when injecting liquid fuels directly in the combustion chamber [12]. The micro-explosion characteristics can be effectively controlled by varying the degree of fuel emulsification under the pre-set heating conditions provided by ad-hoc heating schemes.

The presence of dissolved carbon dioxide (mostly as part of water and air bubbles) in a liquid effectively reduces the interfacial tension [13]. Lower interfacial tension intensifies the liquid droplet disruption with an increase in the ambient gas temperature. This is accompanied by accelerated phase transitions, a vapor buffer zone formed around liquid fragments, and increased pressure in the gas phase. Gao et al. [14] studied the evaporation and explosive boiling of distilled and sea water in a high-vacuum vessel. The breakup characteristics were found to depend on the ambient pressure, heat flux, and degree of superheating [14]. The breakup delay time becomes shorter with an increase in the heat flux, and the number of secondary fragments increases with a decrease in pressure and increase in the degree of superheating [15]. The Weber number plays a pivotal role as well. An increase in the gas temperature shifts the transition-to-breakup boundary to lower critical values of the Weber number [16]. With gas-saturated emulsified droplets (containing CO₂, air, or water vapor), it is important to supply less energy and to provide faster stabilization of the partial or full breakup regime due to the explosive breakup of droplets [15,17]. The breakup of emulsion droplets occurs at high temperatures and concentration in Refs. [15,17]. The greater the difference between the boiling points of liquid components, the more extensive the explosive breakup, which is clearly illustrated by kerosene, diesel fuel, petroleum, and turbine oil in water emulsions [18].

In many practical applications (pharmaceuticals, microencapsulation, and micro-particle coverage), droplet atomization requires mild temperatures and low energy, while the minimum size and maximum velocity of droplet flow are maintained, and the atomization process remains scalable and controllable. To analyze the physical patterns of micro-explosions as an atomization method, the energy balance of the resulting secondary droplets is determined, in particular, their surface and kinetic energy. Based on the secondary droplet sizes and velocities obtained in the experiments, it was determined that the surface energy should exceed the kinetic energy for the effective micro-explosion (fragmentation) [19,20]. There

is also a micro-explosion model for fuel-in-water emulsion droplets based on the solution of the heat equation in a spherical coordinate system [21]. Water nucleation temperature reached at the water/fuel interface is considered a threshold (critical) condition for the micro-explosive breakup [18,21]. A numerical model [22] can be used for simulating the breakup of immiscible liquids, for instance, fuel oil and water. It is based on the solution of Navier-Stokes equation and energy conservation laws for incompressible liquids.

The breakup duration is generally determined as a function of the critical Weber numbers and the density of the supplied heat flux for several aerosol generation techniques (collision with a wall and air jet, micro-explosive breakup upon superheating) [23]. The comparative analysis of these techniques revealed a substantial advantage of heated droplet micro-explosion, because the droplet size decreased by 3–10 times depending on the heat flux supplied. The minimum breakup time was 10–20 ms. The total surface area of the liquid increased by 60–100 times [23]. Antonov and Strizhak [24] presented their experimental findings on the main heat and mass transfer processes observed during the heating, evaporation, boiling, and explosive breakup of two- and multi-component droplets in a heated air flow. They analyzed the effects influencing the explosive breakup delay as a function of temperature, component concentration and size of multi-component droplets. They also determined the optimal conditions of such breakup. The research findings [24] became the basis for the experiments in Ref. [25], where the authors analyzed the integral characteristics of secondary atomization of water droplets with and without CO₂ bubbles. They used the two most promising schemes: parent droplets colliding with each other and their micro-explosive breakup upon intense heating. As established, the best choice is to combine these two schemes, providing a several-fold increase in the liquid surface area. However, Ref. [25] and other known studies on this subject did not consider solid impurities present in liquids or heterogeneous energy distribution as triggers of intensified micro-explosive breakup. This motivated our present research.

Most of the research into the breakup of gas-saturated liquid droplets focuses on how breakup characteristics depends on the impact of heat flux, heating scheme, ambient parameters and liquid components, degree of superheating, size and geometry of parent droplets, as well as specialized liquid additives. It is still not fully understood how fragmentation evolves at the interface within a droplet (for instance, the stages of this process are not specified) with varying bubble saturation and concentration; the identification of gases and vapors in droplets does not receive much attention either. The aim of this work was to determine experimentally and theoretically the droplet breakup regimes with varying quality of the dispersed phase as well as the integral characteristics of the process. This research is an attempt to: identify the critical conditions at which gas saturation intensifies droplet breakup, (determine the impact of vaporization centers in the form of gas bubbles and solid particles on the location of the main bubbles in a parent droplet and patterns of its deformation before breakup, study the above effects and factors for parent droplets experimentally and theoretically with varying composition of the dispersed phase in the ranges corresponding to promising fuel applications, and understand how coal particle concentration affects the breakup delay times for droplets of promising coal-water slurries for high-potential fuel dispersion methods in energy-generating plants and engines, as well as in the chemical industry and other sectors.

Experimental procedure and materials

We used diesel fuel and four varieties of water with varying concentration of solid particles and gas bubbles to study the effect of high mass concentration of coal particles (0% to 60%) on the droplet breakup delay times of promising slurries. Table 1 below lists the main properties of the liquids under study. The research findings from Ref. [25] confirmed the hypothesis that gaseous and solid additives in two-liquid emulsion and slurry droplets intensify their heating and breakup. However, it is important to determine the variation ranges of the droplet breakup delay times as well as the number and sizes of the resulting secondary fragments. Such comprehensive studies are possible when droplets containing several types of

water with markedly different component compositions are compared in terms of their breakup characteristics.

Table 1 – Properties of components used in the experiments based on the data from Ref. [26].

Liquid component	Properties				
	k_l , W/(m·K)	C_l , J/(kg·K)	ρ_l , kg/m ³	T_b , K	a , m ² /s
Diesel fuel (n-dodecane)	0.137	2215	743.7	489.5	$8.3167 \cdot 10^{-7}$
Water #1 [GOST 6709-72]	0.599	4182	998.2	373.15	$1.4349 \cdot 10^{-7}$
Water #2 [tap water]	0.6108	4244.4	1010.7	673	$1.4238 \cdot 10^{-7}$
Water #3 [concentration of CO ₂ = 0.25 %]	0.6108	4244.5	1008.2	673	$1.4273 \cdot 10^{-7}$
Water #4 [concentration of CO ₂ = 0.4 %]	0.6108	4244.5	1006.7	673	$1.4295 \cdot 10^{-7}$

The main properties (density, heat capacity, and thermal conductivity) of the water core were given by the following formulas with due consideration of the volume fractions of solid and gaseous components in two-liquid droplets (assuming they are additive):

$$\bar{\rho}_l = \left[\sum_{i=1}^{i=N} (Y_i / \rho_{li}) \right]^{-1}, \quad (1)$$

where Y_i is the mass fraction of the i -th component, and ρ_{li} – is the density of the i -th component.

$$\bar{c}_l = \sum_{i=1}^{i=N} (Y_i \cdot c_{li}), \quad (2)$$

where Y_i is the mass fraction of the i -th component, and c_{li} is the heat capacity of the i -th component.

$$\bar{k}_l = \left[\sum_{i=1}^{i=N} (Y_i \cdot k_{li}^2) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

where Y_i is the mass fraction of the i -th component, and k_{li} is the thermal conductivity of the i -th component.

For the compositions with gas-saturated water, we calculated the volume fractions and mass fractions of carbon dioxide using equations (4)–(6):

$$V_{CO_2} = Y_{(v)CO_2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot R_w^2, \quad (4)$$

$$V_{H_2O} = Y_{(v)H_2O} \cdot \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot R_w^2, \quad (5)$$

$$Y_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{m_{H_2O} + m_{CO_2}} = \frac{\rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}}{\rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + \rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}}, \quad (6)$$

where V_{CO_2} is the volume of carbon dioxide in the water core, V_{H_2O} is the volume of water in the water core, $Y_{(v)CO_2}$ is the volume fraction of carbon dioxide, $Y_{(v)H_2O}$ is the volume fraction of water, R_w is the radius of the water core, m_{CO_2} is the mass of water, ρ_{CO_2} – is the density of carbon dioxide, and ρ_{H_2O} is the density of water.

For compositions including tap water, the properties of solid impurities were approximated using the properties of bituminous coal according to equations (7)–(9). The properties of the solid insoluble component were determined as a function of temperature:

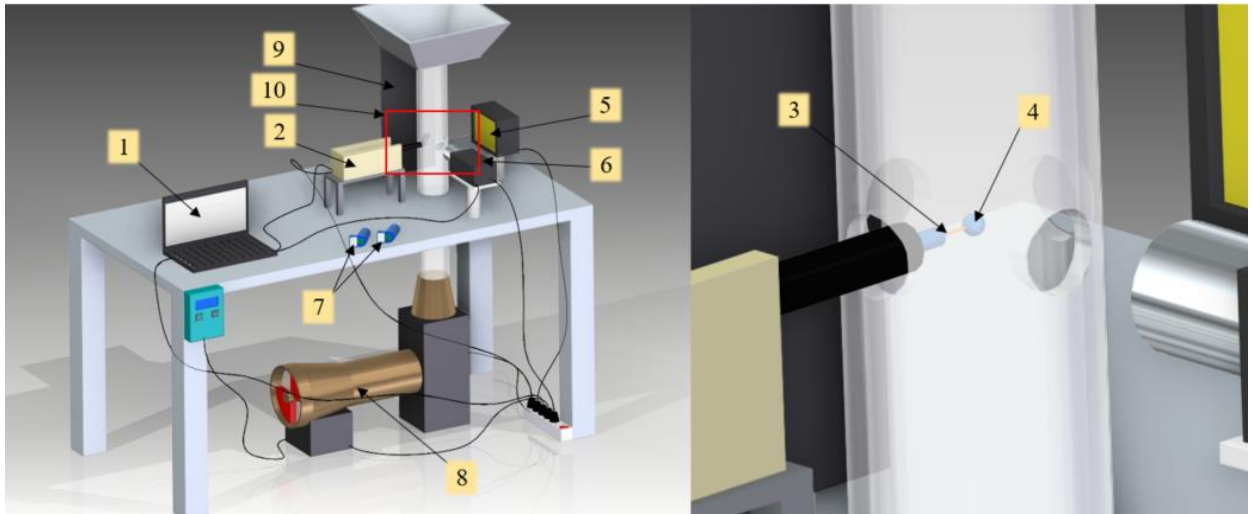
$$\rho_{li} = 0.003 \cdot T_w^2 - 1.4065 \cdot T_w + 1402.9, \quad (7)$$

$$c_{li} = 1154 \cdot T_w^{0.0346}, \quad (8)$$

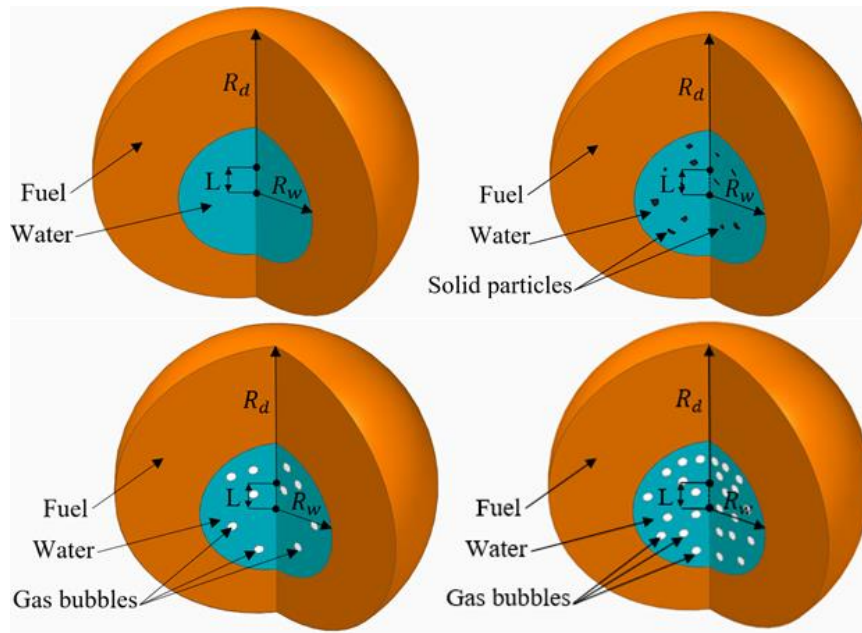
$$k_{li} = 0.0000009 \cdot T_w^2 - 0.0006 \cdot T_w + 0.2707, \quad (9)$$

where ρ_{li} is the density of the i -th component, c_{li} is the heat capacity of the i -th component, and k_{li} is the thermal conductivity of the i -th component.

This research focuses on the parent droplet heating scheme in a heated air flow presented in figure 2. The air temperature (T_a) was varied from 350 °C to 450 °C. The lower boundary of the ambient gas temperature variation range corresponds to the minimum temperature of consistent droplet breakup. The upper boundary corresponds to the maximum possible ambient gas temperature for the experimental setup used. Refs. [18,25] show that droplets break up most extensively at such ambient gas temperatures. Additional experiments were conducted at an air temperature of at least 300 °C to determine the transition boundary to the droplet evaporation regime without breakup.



a



b

Figure 2 – Scheme of the experiment (*a*) and schematically represented droplets of liquids under study (*b*): 1 – computer; 2 – motorized manipulator; 3 – holder; 4 – droplet; 5 – light; 6 – high-speed camera; 7 – Finnpiquette Novus; 8 – hot-air blower; 9 – screen; 10 – recording area

Droplets were generated in the same way as in Ref. [18]: using two Finnpiquette Novus dispensers with a volume increment of $0.01 \mu\text{l}$. They were used to sample the liquids for water/fuel droplets. Parent droplets were placed on a nichrome wire 0.2 mm in diameter. Initially, we formed a water droplet with and without solid additives and gas bubbles of the necessary volume. Then we formed a fuel droplet.

The high-temperature air environment was created using an air heater (Leister LHS 61, maximum output air temperature 973 K) and a high-pressure regenerative blower (Leister Robust with an air flow rate of up to 1200 l/min at 300 K) with an adjustable heated air flow velocity from 0.5 to 5 m/s (figure 2).

The parent droplets were introduced into the test zone using a motorized manipulator with a holder at the end of it. The test zone was lit using a MultiLed QT lamp head to improve the image contrast of the parent and child droplets. The

spotlight had the following parameters: 15° lens; luminous flux 12000 Lumen (white), power 150 W. Light intensity (0–100%) was controlled by MultiLed G8. The droplet heating, evaporation, and breakup were recorded using a Phantom Miro slow-motion video camera. The experiments were recorded at 1000 frames per second with a resolution of 768x768 pixels, and the resulting footage was processed using the Phantom Camera Control software. The scale factor was 0.018 mm/pix.

During the experimental data processing, we recorded the following characteristics: water core shift from the droplet center, droplet breakup delay time, droplet lifetime, and critical bubble size before breakup.

The systematic error in the size measurement (initial droplet diameter and water core shift) was defined by the value of the scale factor (M):

$$\Delta r = \pm M = \pm 0.018 \text{ mm.} \quad (10)$$

The systematic error in the time measurement (breakup delay time and droplet lifetime) was derived from the error in the determination of the moments when the first and the following snapshots were taken:

$$\Delta \tau = \pm 2 \cdot \frac{1}{\text{fps}} = \pm 2 \cdot \frac{1}{1000} = \pm 0.002 \text{ s.} \quad (11)$$

Random errors were calculated using equation (12) with the confidence probability $P = 0.95$: 1.31 s for breakup delay time, 1.38 s for droplet lifetime, 0.08 mm for droplet diameter, and 0.054 mm for water core shift.

$$\Delta(S_i) = \varepsilon \frac{\sigma(i)}{\sqrt{n}}. \quad (12)$$

where $\Delta(S_i)$ is the random error, ε is Student's coefficient, $\sigma(i)$ is the mean square deviation, and n is the number of measurements.

The recording of two-liquid droplet characteristics before their breakup is exemplified in figure 3. It shows the main stages in the automatic tracking of the liquid-liquid interface in a droplet, vaporization centers in the form of bubbles and particles, as well as secondary fragments breaking off from the surface. The algorithm for calculating the characteristics of secondary droplets was based on the

condition that the total volume of secondary droplets should equal that of the parent droplet, accounting for the evaporation at different ambient air temperatures.

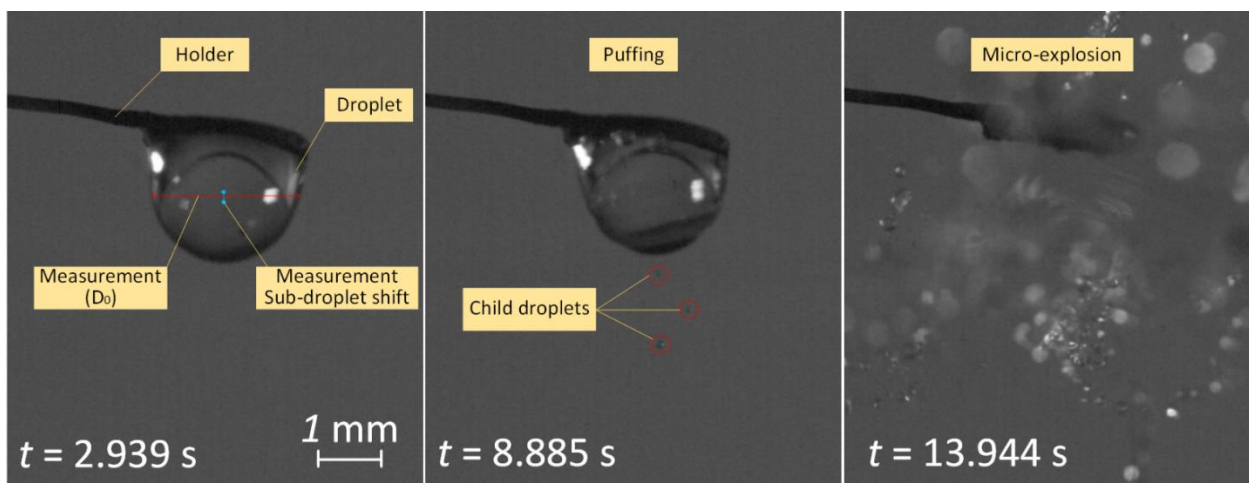


Figure 3 – Typical images with the micro-explosive breakup characteristics for two-liquid droplets

Results and Discussion

Based on the experiments, we identified the following key regimes: droplet heating without substantial surface deformation (i.e., gradual droplet shrinking due to evaporation); bubble nucleation and growth in a droplet gradually losing its volume to evaporation; liquid fragments breaking off from the droplet surface (puffing); accumulation of energy in a droplet with the subsequent dynamic micro-explosion.

When analyzing the images obtained for the Diesel fuel/water #1 composition, we identified three typical droplet behaviors: bubble nucleation and growth, local dispersion, and micro-explosive breakup. Bubble nucleation and growth in droplets with an initial diameter of 2.1 mm at 723 K intensified after 7 s of heating. Bubbles were mostly formed at the fuel/water core interface, mainly due to the dispersed phase elements accumulated at this interface in the form of gas bubbles and solid particles. Another important factor was the incomplete wettability of this interface due to the presence of voids and cavities. The micro-explosive

droplet breakup followed its puffing (local dispersion) when a small number of secondary liquid fragments detached themselves from the parent droplet. The droplet breakup delay time and its total lifetime decreased with an increase in the ambient gas temperature.

The experiments with composition 2 (Diesel fuel/water #4) have shown that bubbles do not only emerge at the fuel/water interface but also throughout the water core. An increase in the number of vaporization centers leads to a decrease in the degree of water superheating, hence shorter breakup delay times and fewer secondary fragments. This is conditioned by a decrease in the thermal energy accumulated within the water core before breakup with an increase in the number of vaporization centers.

The composition containing Diesel fuel and water #3 is notable for bubble nucleation and growth at the water/fuel interface. The footage shows that the bubbles observed in the water core of this composition were smaller than in the droplets of Diesel fuel/water #4. This result is confirmed when an increase in the gas bubble concentration intensifies their coalescence into larger bubbles.

When analyzing the experimental data for the composition containing Diesel fuel/water #2, we found that bubble nucleation was normally observed at the water/fuel interface and next to the holder. Bubbles formed at the boundary with the holder do not trigger droplet breakup. Bubbles at the liquid/liquid interface do contribute to the droplet extensive disruption. Another distinguishing feature of this composition is the formation of a significant number of large secondary fragments (20–80 μm in radius). Vaporization centers reduce the degree of superheating and, hence, the accumulated thermal energy. In this case, it is necessary to formulate objective-specific water treatment requirements for practical applications.

The most significant impact on the droplet breakup behavior comes from the thermal factor: the ambient gas temperature. Supplementary material C presents the footage demonstrating significant differences in the droplet breakup regimes with varying ambient gas temperature. We found that the effective micro-explosive

breakup required a certain temperature range: 400–450 °C for the compositions under study. At low temperatures (under 300 °C), the thermal energy supplied was not enough to intensify the vapor bubble growth. That is why droplets most often evaporated after slight deformation. With an increase in the ambient gas-air temperature to 350 °C, secondary fragments detached themselves from the surface of a parent droplet. The breakoff delay times were quite short for such fragments; however, the overall lifetime of a droplet was long (as a rule, at least 10 s) because the liquid was only heated partially, in the near-surface layer, and these heated parts were the ones to break off. With an increase in the ambient gas temperature to 350 °C, the heat supplied was enough for the superheating of the liquid/liquid interface in a large volume. This contributed to the accumulation of energy in the depth of the droplet. After that, vapor filled the entire volume of the droplet, which then broke up in the micro-explosion regime. However, such conditions were only observed in the limited temperature range between 400 and 450 °C. This happened because at too high temperatures, the heating and evaporation rates of the combustible liquid component were so high that the film evaporated very fast, and air and vapor bubbles did not have enough time to fill the droplet. Its size decreased sharply with rare breakoffs of small fragments from its surface. While the role of the vaporization centers in the form of bubbles and solid particles was significant, the thermal factor remained pivotal, because the above droplet behaviors were observed consistently with different amounts of vaporization centers in these temperature ranges.

The alternation of the parent droplet behavior regimes upon heating is caused by a set of interrelated physical/chemical processes and phase transitions. For instance, the most common transformation mechanism of a parent droplet upon heating involved the following stages. Changes in the ambient gas temperature, droplet size, as well as the type and concentration of additives in it led to changes in the breakup delay times and secondary droplet atomization outcomes, but the general trends remained. In particular, droplet heating intensified at the first stage.

Due to the presence of water with high heat capacity and vaporization heat, the initial heating stage of parent droplets can be considered inert. Then the evaporation of liquid combustible component intensified, because the heat removal to the deep layers of water was slowed down. The liquid combustible component had a several times lower heat capacity and higher thermal diffusivity. This, in combination with the high boiling temperature, became the reason why the flammable liquid was superheated to the temperatures above the water boiling point. As a result, the conditions for vapor bubble nucleation and growth were provided at the water/fuel interface. These bubbles then grew and coalesced to form the main bubble. The vapor pressure in it increased until it exceeded the pressure of the surface forces holding it together. The combustible liquid film around the bubble became thinner due to evaporation and bubble growth. The droplet broke up when the bubble size exceeded a certain critical value (usually two to three typical droplet sizes). The presence of vaporization centers in the form of gas bubbles slowed down the water heating as a whole due to the lower total thermal diffusivity (this indicator is an order of magnitude lower for vapors and gases than for liquids). The presence of solid particles as vaporization centers, on the contrary, accelerated the heating of the water core due to their high thermal diffusivity compared to the liquid. Due to gravitational forces and convective flows in droplets, solid particles and gas bubbles agglomerated in the droplets. The action of these effects could be reliably predicted when a united solid particle or bubble was considered a single agglomerate. The bigger these agglomerates, the more significant the differences in the breakup behavior. This pattern is especially important for coal-water slurries in which the concentrations of solid particles reach 60%. At high ambient gas temperatures, the vaporization centers moved so rapidly within the droplet that particles and bubbles agglomerated quite rarely. They consistently did so only after a certain volume of liquid evaporated, which led to droplet breakup.

The experiments revealed some interesting patterns concerning secondary droplets, which were different in number, size, component composition, and

conditions of further heating. For instance, in the experiments we observed parent and child droplets containing vapor and air bubbles and solid particles break up in a chain-like way. This happened because the bubbles and solid particles detached themselves from the surface of the parent droplet together with secondary fragments. As the secondary fragments contained an order of magnitude less liquid than the parent droplet did, the fragmentation intensified in a chain-like way after their formation. At the same time, the difference was quite obvious between the breakup behavior of secondary droplets with different content of solid particles and bubbles. The fewer of such inclusions the initial droplets contained, the longer they were heated, but micro-explosion was still the prevalent breakup regime. These patterns later allowed us to infer the component composition of secondary fragments from their breakup behavior.

The experiments also revealed some important differences in the surface deformation of parent droplets with and without vaporization centers. The fewer of such centers a droplet contained, the more spherical it was. Solid particles in a droplet agglomerated after some time of circulation due to differences in pressures and forces. A droplet stretched towards this agglomerate. Most often, such droplets were oblong ellipsoids stretched towards the oncoming air flow. Then the droplets swirled and moved in the air flow in the form of dumbbells and cylindrical disks. The presence of gas bubbles in a droplet triggered the deformation of its surface in a somewhat chaotic manner. It was an irregular polyhedron with smoothed facets. The deformation was enhanced due to the external forces acting in a heated gas. As the vaporization centers were often displaced from the center towards the periphery of a droplet, we often observed the breakup of droplets with the main vapor bubble located off-center.

The interaction between gas bubbles and water vapors in droplets upon heating played quite an important role, with thermal conditions being pivotal. The higher the ambient gas temperature was, the more actively the bubbles interacted with vapors. The footage showed bubbles coalescing into large agglomerates leading

to faster breakup but fewer secondary fragments. This way it is possible to tackle specific practical problems: either to intensify the breakup with minimum delay or to increase the area of the aerosol cloud resulting from breakup. Control over the number of vaporization centers makes it possible to obtain a specific increment in the values of characteristics and intensify the breakup of heterogeneous parent and child droplets.

References

1. Verkhovskaya I, Petrov E, Verkhovskiy A. Manufacturing the Technology of Xenon-Containing Drinking Water and its Influence on Some Psychophysiological Characteristics of Man. MATEC Web Conf., vol. 79, 2016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167901058>.
2. Kumar R, Thakur AK, Chaudhari P, Banerjee N. Particle Size Reduction Techniques of Pharmaceutical Compounds for the Enhancement of Their Dissolution Rate and Bioavailability. J Pharm Innov 2021. <https://doi.org/10.1007/s12247-020-09530-5>.
3. Haarhoff J, Edzwald JK. Adapting dissolved air flotation for the clarification of seawater. Desalination 2013;311:90–4. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2012.10.035>.
4. Creamer KS, Chen Y, Williams CM, Cheng JJ. Stable thermophilic anaerobic digestion of dissolved air flotation (DAF) sludge by co-digestion with swine manure. Bioresour Technol 2010;101:3020–4. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.12.029>.
5. Yoo S, Hsieh JS. Advanced water recycling through electrochemical treatment of effluent from dissolved air flotation unit of food processing industry. vol. 61. 2010. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.802>.
6. Rodrigues RT, Rubio J. DAF–dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. Int J Miner Process 2007;82:1–13. <https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2006.07.019>.

7. Aliff Radzuan MR, Abia-Biteo Belope MA, Thorpe RB. Removal of fine oil droplets from oil-in-water mixtures by dissolved air flotation. *Chem Eng Res Des* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.09.013>.
8. Riestenberg D, Chiu E, Gborigi M, Liang L, West OR, Tsouris C. Investigation of jet breakup and droplet size distribution of liquid CO₂ and water systems - Implications for CO₂ hydrate formation for ocean carbon sequestration. *Am Mineral* 2004;89:1240–6. <https://doi.org/10.2138/am-2004-8-911>.
9. Widegren JA, Bruno TJ. Vapor pressure measurements on saturated biodiesel fuel esters by the concatenated gas saturation method. *Fuel* 2011;90:1833–9. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.11.034>.
10. Kumar MS, Bellettre J, Tazerout M. The use of biofuel emulsions as fuel for diesel engines: A review. *Proc Inst Mech Eng Part A J Power Energy* 2009;223:729–42. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE758>.
11. Damiani D, Tarlet D, Meillot E. A Particle-Tracking-Velocimetry (PTV) Investigation of Liquid Injection in a DC Plasma Jet. *J Therm Spray Technol* 2014;23:340–53. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0050-5>.
12. Shinjo J, Xia J, Ganippa LC, Megaritis A. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets. *Phys Fluids* 2014. <https://doi.org/10.1063/1.4897918>.
13. Nowrouzi I, Manshad AK, Mohammadi AH. Effects of dissolved carbon dioxide and ions in water on the dynamic interfacial tension of water and oil in the process of carbonated smart water injection into oil reservoirs. *Fuel* 2019;243:569–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.069>.
14. Gao W, Qi Q, Zhang J, Chen G, Wu D. An experimental study on explosive boiling of superheated droplets in vacuum spray flash evaporation. *Int J Heat Mass Transf* 2019;144:118552. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2019.118552>.

15. Watanabe H, Harada T, Matsushita Y, Aoki H, Miura T. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel. *Int J Heat Mass Transf* 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.033>.
16. Suzuki Y, Harada T, Shoji M, Watanabe H, Matsushita Y, Aoki H, et al. Visualization of Internal Behavior in Emulsified Fuel Droplets and the Effect of Surfactant on Secondary Atomization. *Kagaku Kogaku Ronbunshu* 2010. <https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.36.557>.
17. Melo-Espinosa EA, Bellettre J, Tarlet D, Montillet A, Piloto-Rodríguez R, Verhelst S. Experimental investigation of emulsified fuels produced with a micro-channel emulsifier: Puffing and micro-explosion analyses. *Fuel* 2018;219:320–30. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2018.01.103>.
18. Antonov D V., Piskunov M V., Strizhak PA. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions. *Int J Therm Sci* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.011>.
19. Tarlet D, Mura E, Josset C, Bellettre J, Allouis C, Massoli P. Distribution of thermal energy of child-droplets issued from an optimal micro-explosion. *Int J Heat Mass Transf* 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.054>.
20. Tarlet D, Allouis C, Bellettre J. The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion. *Int J Therm Sci* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.04.008>.
21. Sazhin SS, Bar-Kohany T, Nissar Z, Antonov D, Strizhak PA, Rybdylova OD. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets. *Int J Heat Mass Transf* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120238>.
22. Fostiropoulos S, Strotos G, Nikolopoulos N, Gavaises M. A simple model for breakup time prediction of water-heavy fuel oil emulsion droplets. *Int J Heat Mass Transf* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120581>.

23. Shlegel N, Strizhak P, Tarlet D, Bellettre J. Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations. *Int Commun Heat Mass Transf* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104329>.
24. Antonov D V., Strizhak PA. Heating, evaporation, fragmentation, and breakup of multi-component liquid droplets when heated in air flow. *Chem Eng Res Des* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.03.037>.
25. Antonov D V., Shlegel NE, Strizhak PA. Secondary atomization of gas-saturated liquid droplets as a result of their collisions and micro-explosion. *Chem Eng Res Des* 2020;162. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.08.011>.
26. Yaws, L C. *Yaws' handbook of thermodynamic and physical properties of chemical compounds*. Knovel 2003.