

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
Отделение школы (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бутакова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону
УДК 681.51:66.069.832:621.45.04

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Семёнова Александра Евгеньевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Пискунов Максим Владимирович	к.ф.-м.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД	Сечин Александр Иванович	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель профиля ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ И.Н. Бутакова 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, вырабатывать 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
Отделение школы (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бугакова

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

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ03	Семёновой Александре Евгеньевне

Тема работы:

АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	03.02.2022 г., № 34-66/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	06.06.2022
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Обзор литературных источников, соответствующих заданной тематике. 2. Экспериментальный стенд и методы исследования в рамках магистерской работы. 3. Данные о перспективных компонентах многокомпонентных жидких топлив с известными свойствами. 4. Требования к системе управления подготовки и подачи многокомпонентного жидкого топлива – трехуровневая система; – на основе микропроцессорной техники; – обеспечение степени затухания переходных процессов не ниже 0,8.
--	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Экспериментальные исследования. 2. Проектирование АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону. 3. Мнемосхема АСУ ТП. 4. Расчет параметров настройки регулятора. 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 6. Социальная ответственность.
Перечень графического материала	1. Схема структурная. 2. Схема функциональная. 3. Схема принципиальная электрическая шкафа автоматизации. 4. Схема монтажная внешних проводок. 5. Сборочный чертеж шкафа автоматизации.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна
Социальная ответственность	Сечин Александр Иванович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
1. Экспериментальные исследования	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	4.02.2022
---	-----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Пискунов Максим Владимирович	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Семёнова Александра Евгеньевна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 136 страниц, 20 рисунков, 41 таблицу, 62 источника, 2 приложения.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, взаимодействие капель, жидкое многокомпонентное топливо, микропроцессорные технические средства, эмульгирование.

Цель работы – разработка АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону.

В процессе выполнения работы произведен обзор литературных источников и выполнен анализ объекта автоматизации. Проведены экспериментальные исследования процесса взаимодействия капли многокомпонентного жидкого топлива с твердой нагретой поверхностью. Разработана проектная и конструкторская документация.

В результате выполнения магистерской диссертации с использованием современных микропроцессорных средств автоматизации разработана автоматизированная система управления процессом подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону. Автоматизированная система управления разработана с учетом технических требований, нормативных документов и исходя из результатов научно-исследовательской работы.

Основным преимуществом разработанной АСУ ТП является наличие SCADA-системы на основе использования программно-технического комплекса, который предоставляет возможность оперативно отреагировать на любую сложную ситуацию в процессе эксплуатации системы, а также удаленно поддерживать функционирование системы в целом.

Оглавление

Введение	10
1 Экспериментальные исследования.....	12
1.1 Обзор литературы.....	12
1.2 Экспериментальная методика.....	13
1.2.1 Материалы.....	13
1.2.2 Экспериментальный стенд.....	14
1.2.3 Экспериментальная методика	16
1.3 Результаты и обсуждение.....	21
1.3.1 Морфологические наблюдения	21
1.3.2 Характеристики растекания	23
1.3.3 Характеристики коронообразной структуры.....	28
2 Проектирование АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону.....	33
2.1 Системный анализ объекта автоматизации.....	33
2.2 Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления	35
2.3 Разработка функциональной схемы системы управления.....	36
2.4 Составление опросных листов на приборы и средства автоматизации.	40
2.5 Выбор технических средств системы управления, составление спецификации.....	40
2.5.1 Выбор технических средств измерения температуры	41
2.5.2 Выбор технических средств измерения расхода.....	42
2.5.3 Выбор технических средств измерения уровня.....	43
2.5.4 Выбор исполнительного механизма	43
2.5.5 Выбор регулирующего устройства.....	44
2.6 Разработка принципиальной электрической схемы шкафа автоматизации	45
2.7 Проектирование схемы монтажной внешних проводок.....	47
2.8 Разработка сборочного чертежа шкафа автоматизации	50
3 Разработка экранных форм мнемосхем SCADA-системы.....	52
4 Расчет параметров настройки регулятора	54

4.1	Идентификация объекта управления.....	54
4.2	Расчет параметров настройки регулятора.....	57
4.3	Определение оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора.....	62
4.4	Расчет, построение и оценка качества переходного процесса в замкнутой АСУ по каналу задающего воздействия.....	62
4.5	Оценка качества регулирования	65
5	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	67
5.1	Потенциальные потребители результатов исследования	67
5.2	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	68
5.3	FAST-анализ.....	70
5.4	SWOT-анализ	74
5.5	Оценка готовности проекта к коммерциализации	75
5.6	Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	77
5.7	Инициация проекта.....	78
5.8	Планирование управления научно-техническим проектом.....	80
5.10	Бюджет научного исследования.....	84
5.11	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	87
6	Социальная ответственность.....	93
6.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	94
6.1.1	Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.....	94
6.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	94
6.2	Производственная безопасность.....	95
6.2.1	Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования	95
6.2.2	Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора	101
6.3	Экологическая безопасность	103

6.3.1 Анализ влияния объекта на окружающую среду	103
6.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	103
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	104
6.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	104
6.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	104
6.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий в случае возникновения ЧС	105
Заключение	107
Список публикаций.....	109
Список использованных источников.....	110
Приложение А Опросные листы на технические средства измерения.....	116
Приложение В Characteristics of unsteady motion of a water-in-oil emulsion droplet in collision with a solid heated wall under conditions of convective heat transfer.....	118

Графический материал: на отдельных листах

ФЮРА.421000.011 С1 Схема структурная

ФЮРА.421000.011 С2 Схема функциональная

ФЮРА.421000.011 СО Заказная спецификация приборов и средств автоматизации

ФЮРА.421000.011 ЭЗ Схема принципиальная электрическая шкафа автоматизации

ФЮРА.421000.011 ПЭ Перечень элементов схемы принципиальной электрической

ФЮРА.421000.011 С4 Схема монтажная внешних проводок

ФЮРА.421000.011 СБ Сборочный чертеж шкафа автоматизации

ФЮРА.421000.011 СО1 Перечень составных частей шкафа автоматизации

Введение

Во многих современных технологиях и практических приложениях, в которых основной рабочий процесс неуклонно связан с соударением групп капель и спреев между собой и с различными поверхностями, применяются многокомпонентные жидкости для оптимальной настройки функционала этих технологий. Среди них выделяют трехмерную печать и биопечать отверждаемыми полимерами [1], микропроизводство биоматериалов [2], получение гидрогелей и микрогелей [3], безопасный транспорт лекарств и живых клеточных структур [4], одноэтапное изготовление функциональных покрытий и материалов [5] и соударение многофазного жидкого топлива со стенками камер сгорания [6,7]. При подборе рабочих жидкостей в рамках этих технологий вследствие существенных различий в их свойствах добиваются получения капель и спреев с управляемой гетерогенной структурой. При этом, если рабочие в рамках технологий процессы формирования сложных по внутренней структуре и компонентному составу капельных жидкостей изучены достаточно хорошо, например, различные методы эмульгирования, инкапсуляции, полимеризации и другие, то взаимодействие капель и микрокапель таких жидкостей с различными по свойствам поверхностями представляет проблемную область исследований с ограниченным количеством известных экспериментальных и теоретических работ.

Целью работы является разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону.

Основными задачами выпускной квалификационной работы являются:

- обзор литературных источников;
- экспериментальное исследование процесса взаимодействия капли многокомпонентного жидкого топлива с твердой нагретой поверхностью для проверки его работоспособности в условиях разрабатываемой системы.
- проведение системного анализа объекта автоматизации;

- выбор структуры автоматизированной системы управления;
- разработка необходимой для проектирования системы проектной документации:
 - схема структурная;
 - схема функциональная;
 - заказная спецификация;
 - схема монтажная внешних проводок;
 - схема принципиальная электрическая шкафа автоматизации;
 - перечень элементов схемы принципиальной электрической;
 - сборочный чертеж шкафа автоматизации;
- разработка мнемосхемы SCADA-системы;
- расчет параметров настройки регулятора.

Разработанная система должна отвечать следующим требованиям:

- осуществление управления технологическим объектом в режиме реального времени;
- реализация решений по управлению должна осуществляться средствами вычислительной микропроцессорной техники и человеком-оператором;
- обеспечение управления технологическим процессом в соответствии с принятыми критериями эффективности функционирования;
- обладание требуемым уровнем надежности;
- обеспечение возможности функционирования с системами управления смежных уровней иерархии и другими АСУ ТП;
- возможность модернизации и развития.

1 Экспериментальные исследования

1.1 Обзор литературы

Известно, что применение альтернативных эмульсионных топлив является хорошо изученным подходом к снижению вредных выбросов при сжигании углеводородов без заметного снижения производительности двигателя [8,9]. Механизмы, условия и параметры этого снижения также довольно подробно изучены [8]. Малоизученными остаются вопросы, связанные с поведением первично распыленных капель эмульсионных (многокомпонентных) топлив при соударении со стенкой [10,11] и между собой [12]. Ответы на эти вопросы будут способствовать накоплению знаний о вторичном распылении капель эмульсий и микроэмульсий при взаимодействии с нагретыми поверхностями [13,14]. В свою очередь, такие знания представляют интерес для исследований и технологий оптимизации и управления распылением топлива в камерах сгорания [13,15], результаты которых в конечном итоге важны при рассмотрении упомянутых экологических и энергетических процессов, а также в целом при создании новых многофазных жидких топлив [16–18]. В плане морфологических наблюдений при таких высоких концентрациях воды отмечаются некоторые отличия при сравнении с чистым биодизелем, которые проявляются в подавлении неустойчивости контактной линии и появления «пальцеобразных» структур обода [16]. Основная роль эмульгирования в существовании явления разбрызгивания капель эмульсий и в проявлении формы неустойчивости контактной линии при растекании показана также в исследовании [17].

Другим важным и малоисследованным аспектом в изучении поведения капель эмульсий, соударяющихся с твердой поверхностью, является температура последней. В случае капель неньютоновских жидкостей (полимерных растворов ксантановой камеди) влияние температуры поверхности ярко проявляется на свойствах жидкости, в частности на существенном изменении вязкости, а также на резко отличающихся динамических параметрах режима стекания капли [19]. К настоящему времени

известны экспериментальные результаты о влиянии температуры поверхности на коэффициент максимального растекания (β_{max}) для капель традиционных однокомпонентных и многокомпонентных топлив (гептан, декан, дизель, авиационное топливо Jet A-1) с учетом характерных чисел Вебера и режима теплообмена (пленочного испарения) [15]. Показана значимость учета вязкости топлива при температурах, повышенных относительно комнатной вследствие нагрева жидкости от поверхности взаимодействия, для точного предсказания значений β_{max} .

Кроме того, при оценке вклада температуры поверхности взаимодействия в растекание и стекание капель важно учитывать и другой влияющий фактор – скорость взаимодействия. Компински и др. [20] на примере капель однокомпонентных и двухкомпонентных топлив (на основе гексана и декана) установили, что увеличение этой скорости приводит к снижению температуры поверхности, граничной для некоторых из выделенных авторами режимов взаимодействия.

Таким образом, поскольку для капель эмульсий подобных результатов, описанных в предыдущих абзацах для капель различных топлив и неньютоновских жидкостей, не обнаружено, то в качестве цели работы рассматривается экспериментальное исследование динамических (соотношений энергий, движущих процесс взаимодействия) и кинематических (интегральных параметров растекания и разбрызгивания, средней скорости смачивания в фазе смачивания/равновесия) характеристик неустановившегося движения капли обратной эмульсии при соударении с твердой нагретой стенкой в условиях конвективного испарения.

1.2 Экспериментальная методика

1.2.1 Материалы

Для приготовления эмульсий типа «вода-в-масле» использовались три основных компонента: дистиллированная вода в качестве дисперсной фазы, углеводород *n*-декан (ГОСТ 2706.2-74, номер CAS: 124-18-5, степень чистоты

$\geq 99\%$, компания «Кемстор», Россия) и масло базовое изопарафиновое HVI-2 (ТУ 38.401-58-416-2014, ПАО ТАТНЕФТЬ, Татарстан) в качестве непрерывной фазы. При смешении масла и *n*-декана формировалась однородная прозрачная жидкость. Для стабилизации эмульсий применялось поверхностно-активное вещество (ПАВ) сорбитан моноолеат (Span 80, Sigma-Aldrich, номер CAS 1338-43-8). С использованием данных компонентов получены составы с различными массовыми концентрациями компонентов (Таблица 1).

Таблица 1 – Компонентный состав исследуемых эмульсий

Состав	Непрерывная фаза		Дисперсная фаза	ПАВ
	<i>n</i> -Декан (масс.%)	Масло HVI-2 (масс.%)	Вода (масс.%)	Span 80 (масс.%)
C1	47	30	20	3
C2	37	30	30	3
C3	27	30	40	3
C4	74	20	5	1
C5	34	60	5	1
C6	-	94	5	1

Для приготовления эмульсий использовались электронный дозатор Thermo Scientific Ленпипет Новус (дозირуемый объем 100...1000 мкл) и аналитические весы ViBRA AJH-420CE (диапазон рабочих весов 0,02...420 г, точность $\pm 0,01$ г). Полученная смесь перемешивалась с использованием гомогенизатора Polytron PT 2500 E (диапазон рабочих объемов 0,05...2500 мл, диапазон скоростей 500...30 тыс. об/мин.) в течение трех минут при скорости 10 тыс. об/мин.

1.2.2 Экспериментальный стенд

Эксперименты по взаимодействию капли эмульсии с твердой нагретой поверхностью проведены на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рисунке 1.

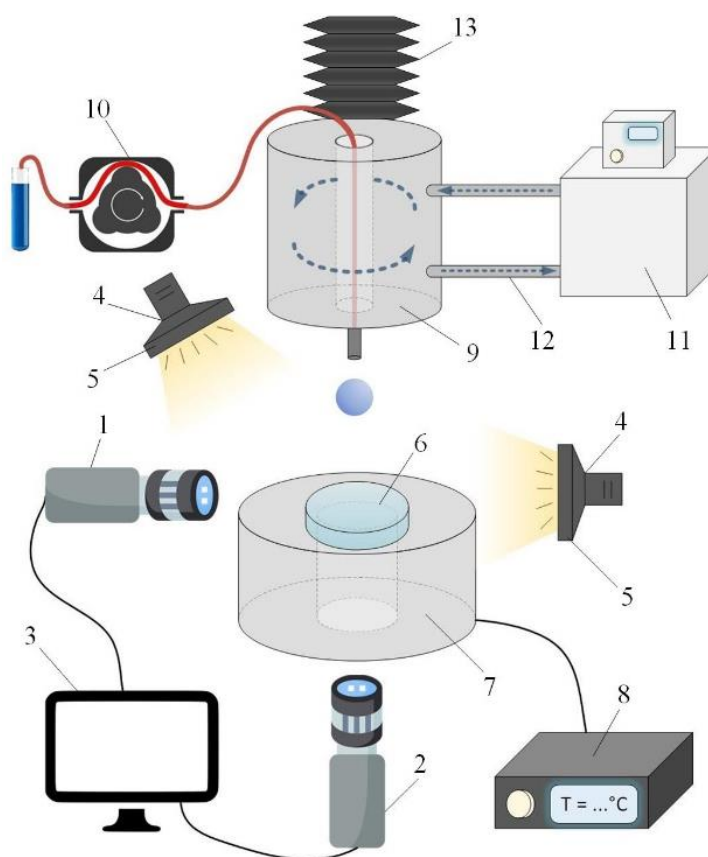


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда: 1, 2 – высокоскоростные видеокамеры, 3 – ПК, 4, 5 – система освещения, 6 – сапфировая подложка, 7 – нагревательный элемент, 8 – контроллер температуры, 9 – термостатируемая рубашка с соплом, 10 – перистальтический насос, 11 – криостат, 12 – внешний контур криостата, 13 – линейное координатное устройство, 14 – термоизоляционная заслонка

Две высокоскоростные видеокамеры (Phantom Miro M110: скорость съемки 1900 кадров/с, разрешение 640×480 пикселей; Phantom Miro M310: скорость съемки 10000 кадров/с, разрешение 768×304 пикселей) и система освещения (блок питания GSVITEC MultiLED G8 и два прожектора GSVITEC MultiLED QT с диффузорами для рассеяния света) использовались для получения теневых изображений процесса взаимодействия снизу и сбоку. Капля генерировалась с использованием дозирующего перистальтического насоса LongerPump BT100-1F (установленный объем дозирования 0,01 мл), подающей трубки Tygon F4040-A для перекачивания углеводородных

жидкостей (внутренний диаметр 2,03 мм) и сопла (иголки с тупым наконечником с внутренним диаметром 0.184 мм). Начальный диаметр капли D_0 , определяемый как $D_0 = (D_{hor} + D_{vert})/2$, где D_{hor} – измеренное значение диаметра капли в горизонтальной плоскости, м, D_{vert} – измеренное значение диаметра капли в вертикальной плоскости, м, составлял 0,0021 м (2,1 мм).

Нагрев сапфировой подложки (толщиной 5 мм и диаметром 25 мм) проводился снизу с использованием нагревательного элемента до температур $T_s = 20, 40, 60, 80$ °С. Температура нагревательного элемента T_H задавалась с помощью контроллера температуры с ПИД-регулятором (шаг 1 °С, диапазон рабочих температур нагрева 40...500 °С, максимальное отклонение температуры от заданного значения ± 2 °С). Отклонение реальной температуры подложки от заданной на контроллере не превышает 25 %. Нагревательный элемент имеет сквозное отверстие в центре для регистрации процесса взаимодействия снизу. Температура подложки T_s контролировалась термоэлектрическим преобразователем типа К Omega Engineering (диапазон измерения 0...480 °С, погрешность измерений $\pm 0,1$ °С, США) и тепловизором Testo 885-2 (диапазон измерения температур -30...1200 °С, температурная чувствительность <30 мК, Testo, погрешность измерений ± 2 °С, AG, Германия) с предустановленной степенью черноты сапфирового стекла 0,96; отклонения показаний термопары от тепловизора не превышали 2,5 °С.

Для варьирования скорости капли ($U_0 = 1.2; 2; 3; 3.6$ м/с) термостатируемая рубашка с соплом закреплялась на линейном координатном устройстве, которое автоматически (по запросу) перемещалось вниз-вверх относительно подложки.

1.2.3 Экспериментальная методика

Измерение плотности исследуемых жидкостей (таблица 2) осуществлялось пикнометрическим методом по средним значениям плотности в рамках пяти измерений. Для измерения эффективной вязкости составов использовалось следующее оборудование: персональный компьютер с программным обеспечением Brookfield Rheocalc T, криостат Termex КРИО-

ВТ-12-1, ротационный вискозиметр Brookfield DV3T-LV (точность $\pm 1\%$, диапазон измерений $1 \dots 6 \cdot 10^6$ мПа·с) в комплекте со Small Sample Adapter (SSA-адаптер) и шпинделем SC4-18. SSA-адаптер предназначен для измерения вязкости на образцах малого объема, от 2 до 16 мл. Для поддержания постоянной температуры состава $T_L = 20^\circ\text{C}$ к SSA-адаптеру подключался внешний контур криостата. Контроль температуры обеспечивался с помощью встроенной в SSA-адаптер термопары (диапазон рабочих температур $-15 \dots +100^\circ\text{C}$). Средние значения вязкости высчитывались впоследствии при каждой скорости сдвига. Полученные зависимости эффективной вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига для исследуемых эмульсий представлены на рисунке 2. В рассматриваемых диапазонах скоростей сдвига эмульсии С1, С2, С4-С6 могут рассматриваться как ньютоновские жидкости, потому что значения их эффективной вязкости изменялись пренебрежимо мало (в расчетах для каждой из этих эмульсий использовалось среднее значение динамической вязкости в рассматриваемом диапазоне скоростей сдвига). Поскольку вязкость эмульсии С3 изменялась (уменьшалась) в рассматриваемом диапазоне скоростей сдвига в несколько раз, а зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига хорошо описывалась реологической моделью Гершеля-Балкли ($\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$, где τ – напряжение сдвига, Па, τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па, n – показатель потока, k – коэффициент консистенции, Па·с ^{n} , $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, 1/с), то данная жидкость определена как склонная к неньютоновскому поведению. Значения динамической вязкости для *n*-декана, масла базового изопарафинового и дистиллированной воды, а также исследуемых эмульсий представлены в таблице 2.

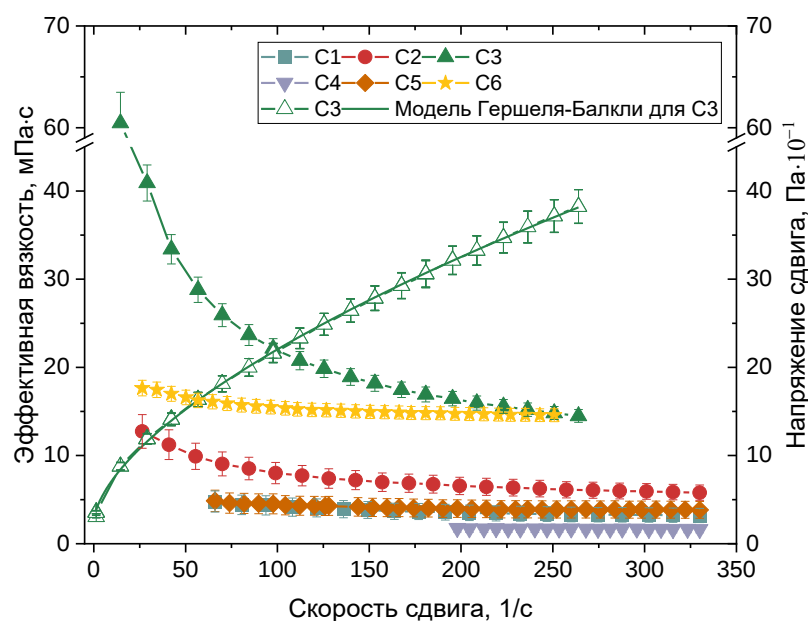


Рисунок 2 – Эффективная вязкость и напряжение сдвига для исследуемых эмульсий при изменении значений скорости сдвига

Таблица 2 – Значения плотности, вязкости и коэффициента поверхностного натяжения для исследуемых жидкостей

Жидкость	Плотность при 20 °С, кг/ м ³	Вязкость при 20 °С, мПа·с	Поверхностное натяжение при 20 °С, мН/м
Дистиллированная вода	997	0,89	72,12±0,02
<i>n</i> -Декан	730	0,84	24,60±0,02
Изопарафиновое масло	824	7,41	48,06±0,01
C1	829	3,20	24,33±0,02
C2	850	5,78	24,63±0,02
C3	867	См. Рис.2	25,13±0,01
C4	792	1,70	23,95±0,03
C5	823	4,36	25,72±0,03
C6	854	16,0	28,04±0,03

Коэффициент поверхностного натяжения на границе «воздух-жидкость» измерялся с помощью тензиометра Kruss K20 (точность ±1%, диапазон измерений 1...999 мН/м) методом дю Нуи. Проведено по три серии измерений для каждого состава. Серия включала от 5 до 10 автоматических измерений. Измерения автоматически прерывались, если разница между измеренным и усредненным значением становилась меньше или равной заданному

стандартному отклонению. Прибор рассчитывал среднее значение поверхностного натяжения для серии измерений. Для поддержания постоянной температуры состава во время измерений на уровне $T_L = 20^\circ\text{C}$ разработана и произведена средствами трехмерной печати из пластика термостатируемая рубашка (полый цилиндр с дном, в стенках которого циркулирует теплоноситель, и со штуцерами для подведения и отвода теплоносителя), в которую погружался лабораторный стакан с исследуемой жидкостью. К термостатируемой рубашке подключался внешний контур криостата. Контроль температуры теплоносителя обеспечивался с помощью термоэлектрического преобразователя типа К (диапазон рабочих температур - $15\dots+100^\circ\text{C}$), встроенного в термостатируемую рубашку. Результаты измерений поверхностного натяжения на границе «жидкость-воздух» для исследуемых жидкостей представлены в таблице 2.

Определяемые в исследовании параметры взаимодействия капли жидкости с поверхностью следующие: диаметр растекания капли D и высота растекающейся капли h на каждом кадре, м (рисунок 3а), коэффициент растекания β ($\beta = D / D_0$), коэффициент максимального растекания $\beta_{\max}$ ($\beta_{\max} = D_{\max} / D_0$, где $D_{\max}$ – максимальный диаметр растекания капли, м), коэффициент высоты капли ζ ($\zeta = h / D_0$), коэффициент минимальной высоты капли $\zeta_{\min}$ ($\zeta_{\min} = h_{\min} / D_0$, где $h_{\min}$ – минимальная высота капли, м), безразмерное время взаимодействия t^* ($t^* = tU_0 / D_0$, где t – время взаимодействия, с), безразмерная температура поверхности T_w^* ($T^* = T_w / T_0$, где T_w – температура поверхности ($^\circ\text{C}$), $T_0 = 19^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды). Кроме того, в исследовании определялись следующие характеристики разбрызгивания капли при соударении с поверхностью: максимальные значения высоты $H_{\text{cor}}^{\max}$ и диаметра $D_{\text{cor}}^{\max}$ коронообразной структуры (в момент ее максимального раскрытия без учета уже отделившихся к этому времени вторичных фрагментов), м, отделяемой от поверхности взаимодействия, безразмерные максимальные высота ($H_{\text{cor}}^* = H_{\text{cor}}^{\max} / D_0$) и диаметр (

$D_{cor}^* = D_{cor}^{max} / D_0$) коронобразной структуры. На рисунке 3 показано, что представляют и как проводились линейные измерения параметров D_{max} и h_{min} (рисунок 3а), h и D (рисунок 3б), а также H_{cor}^{max} и D_{cor}^{max} (рисунок 3в) по кадрам видеозаписей процесса взаимодействия капли с поверхностью.

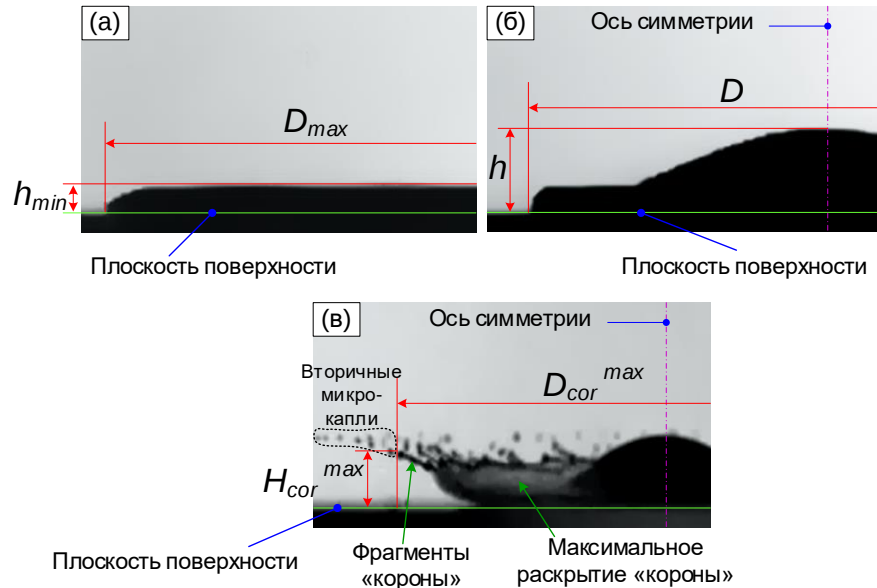


Рисунок 3 – Определяемые параметры растекания капель исследуемых жидкостей при соударении с поверхностью и коронобразной структуры при максимальном раскрытии

Для анализа результатов экспериментального исследования рассчитывались безразмерные критерии гидродинамического подобия, а именно число Вебера ($We = \rho U_0^2 D_0 / \sigma$, где ρ – плотность, кг/м³, σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м), характеризующее отношение сил инерции к силам поверхностного натяжения жидкости; число Рейнольдса для ньютоновских жидкостей ($Re = \rho U_0 D_0 / \mu$, где μ – динамическая вязкость, Па·с), представляющее отношение сил инерции к силам вязкости; число Рейнольдса для неньютоновских жидкостей ($Re_n = \rho D_0^n U_0^{2-n} / k$, где n и k – параметры, полученные согласно модели Гершеля-Балкли), число Онезорге ($Oh = We^{1/2} / Re$), как более сложный безразмерный параметр, равный

отношению сил вязкости к силам поверхностного натяжения и инерции; число Бринкмана ($Br = \mu U_0^2 / [\lambda(T_w - T_L)]$, где λ – коэффициент теплопроводности), представляющее критерий подобия в гидродинамике, равный отношению энергии, теряемой жидкостью вследствие вязкой диссипации при растекании, к энергии, переданной жидкости от нагретой поверхности взаимодействия.

1.3 Результаты и обсуждение

1.3.1 Морфологические наблюдения

Рассмотрены особенности течения конвективных валовых структур, визуализируемых естественным образом за счет наличия частиц дисперсной фазы в эмульсиях, при числах $We = 100–900$ и температурах поверхности $T_w = 40–80$ °С. При $We=100$ обнаружено, что на поздних стадиях фазы смачивания для капель эмульсий С1, С2, С4 и С5 при температурах $T_w = 40–80$ °С происходит образование осесимметричного вала в центре растекающейся капли, от которого развиваются конвективные течения в виде коротких отрезков (лучей), направленных радиально (рисунок 4а, вал выделен красным цветом, стрелками показано направление распространения конвективных течений). Для капель более вязких эмульсий С3 и С6 образуются осесимметричные конвективные валы, визуально формирующие волновое движение, направленное радиально к ободу капли (рисунок 4б – волны выделены красными линиями, стрелками показано направление валов, желтая линия соответствует ободу капли).

При $We = 300$ и при температуре $T_w = 40$ °С не наблюдаются валовые структуры для вязких эмульсий С3 и С6; капля растекается по поверхности равномерно. Для капель эмульсий С1, С2, С4 и С5 конвективные валовые структуры проявляются слабо или совсем отсутствуют. При $T_w=60–80$ °С для капель эмульсий С1, С2, С4 и С5 при смачивании происходит образование осесимметричного вала в центре растекающейся капли и лучеобразных течений, направленных радиально от вала (рисунок 4а).

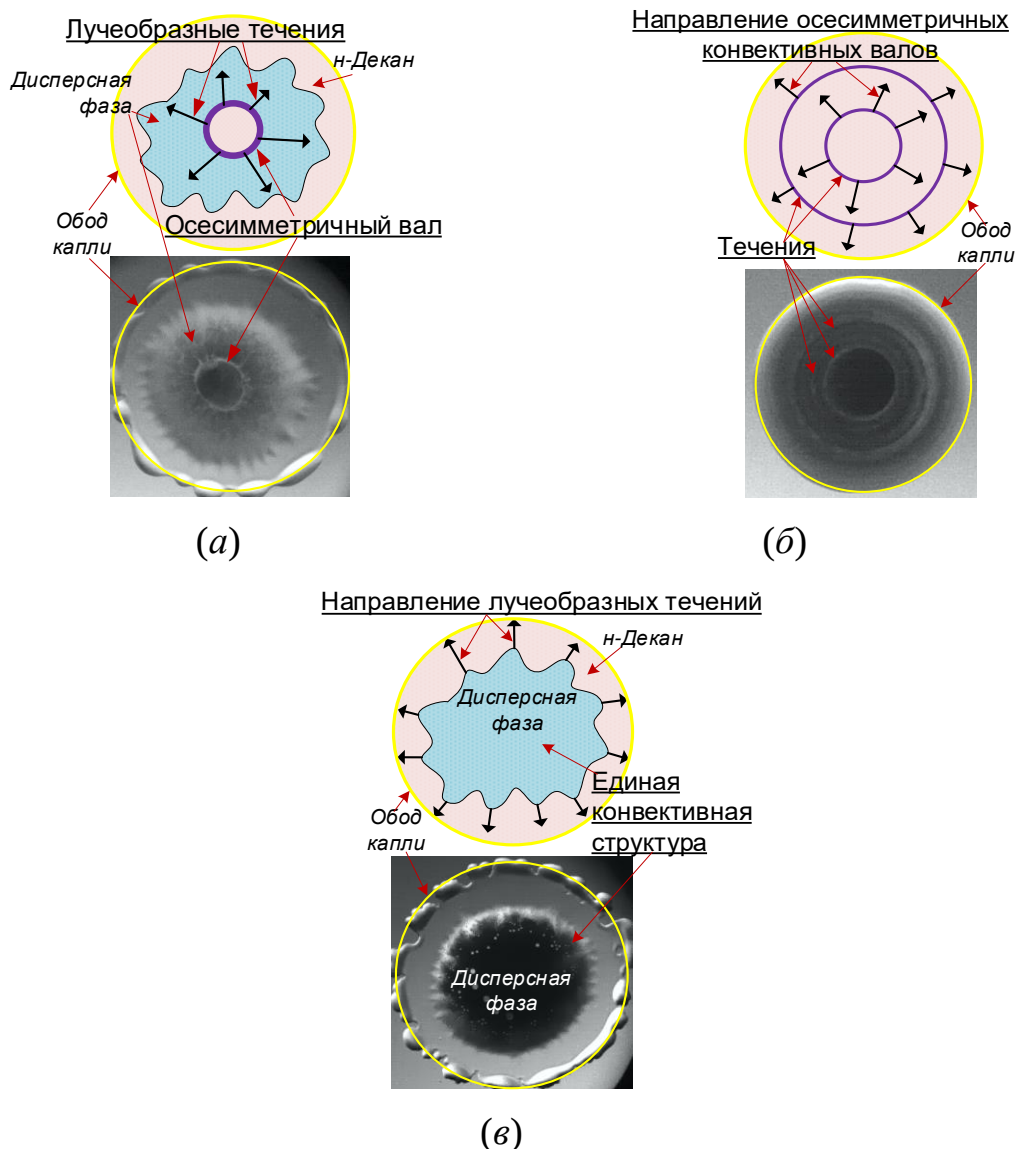


Рисунок 4 – Структуры конвективных течений (схема сверху, кадр реального процесса снизу) в каплях эмульсий С1-С6 в фазе смачивания поверхности после соударения с последней при $T_w=40-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $We=100-900$: (а) – формирование осесимметричного вала в центре капли и радиально направленных лучеобразных течений; (б) – волновое радиально направленное движение осесимметричных конвективных валов; (в) – развитие единой конвективной структуры с лучеобразными течениями без осесимметричного вала в центре капли

Затем такая схема течений преобразуется в единую конвективную структуру, т.е. без центрального вала, исчезающего в процессе смачивания (рисунок 4в), но с лучеобразными течениями. Данная структура,

представленная частицами дисперсной фазы, увеличивается в размерах с течением времени смачивания. В каплях более вязких эмульсий (С3 и С6) при $T_w=60-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ формируется единая структура с волновым движением (рисунок 4б). В случаях $We=600$ и $We=900$ обнаружено, что для всех составов не наблюдаются конвективные валы при $T_w=40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При $T_w=60-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для составов С1, С2, С4 и С5 происходит развитие единой конвективной структуры с лучеобразными течениями (рисунок 4в). При увеличении вязкости (эмульсии С3 и С6) смачивание сопровождается волновым движением (рисунок 4б).

Полученные выводы позволяют связывать напрямую особенности развития течения конвективных валовых структур внутри капель эмульсий с характеристиками их растекания на поздних стадиях после затухания inertia-driven движения, а также косвенно с температурной зависимостью свойств жидкости (ввиду изменения T_w).

1.3.2 Характеристики растекания

При анализе видеоданных и количественных результатов обработки диаметра растекания капель установлено, что для капель эмульсий, *n*-декана и изопарафинового масла, взаимодействующих с гладкой поверхностью, характерным являлось отсутствие стекания капли после достижения максимального диаметра растекания (рисунок 5), которое в то же время свойственно каплям воды [22]. Вместо этого процесса наблюдалось непродолжительное стационарное положение капли (фаза релаксации или в данном случае правильное «плато» [23], поскольку при релаксации диаметр растекания может изменяться) при максимальном растекании, которое сменялось фазой равновесия, сопровождающейся смачиванием гладкой поверхности жидкостью с медленным ростом коэффициента растекания β (с максимальным уклоном β , близким поведению $\sim t^{*1/6}$ в случае *n*-декана и $\sim t^{*1/10}$ в случае масла и эмульсий) в основном под действием капиллярного эффекта, зависящего от поверхностных свойств конкретной жидкости. Такие результаты получены вне зависимости от We и T_w .

Коэффициент растекания капель рассматриваемых жидкостей β в зависимости от безразмерного времени с учетом изменения T_w и We представлен на рисунке 5. При относительно низких числах Вебера ($We = 100$ и $We = 300$) капли растекались по поверхности без разбрызгивания [22,24]. При более высоких значениях Вебера ($We = 600$ и $We = 900$) процесс растекания сопровождался разбрызгиванием с формированием коронообразной структуры, от которой впоследствии отделялись вторичные микрокапли [22,24]. Поскольку при $We = 900$ разрушение коронообразной структуры связано с формированием значительного количества вторичных микрокапель, это приводило к едва заметному снижению коэффициента β в фазе растекания после процесса разрушения (рисунок 5б). В то же время при $We = 600$ разбрызгивание происходило менее интенсивно, поэтому существенного изменения в коэффициенте β до и после разрушения коронообразной структуры не наблюдалось.

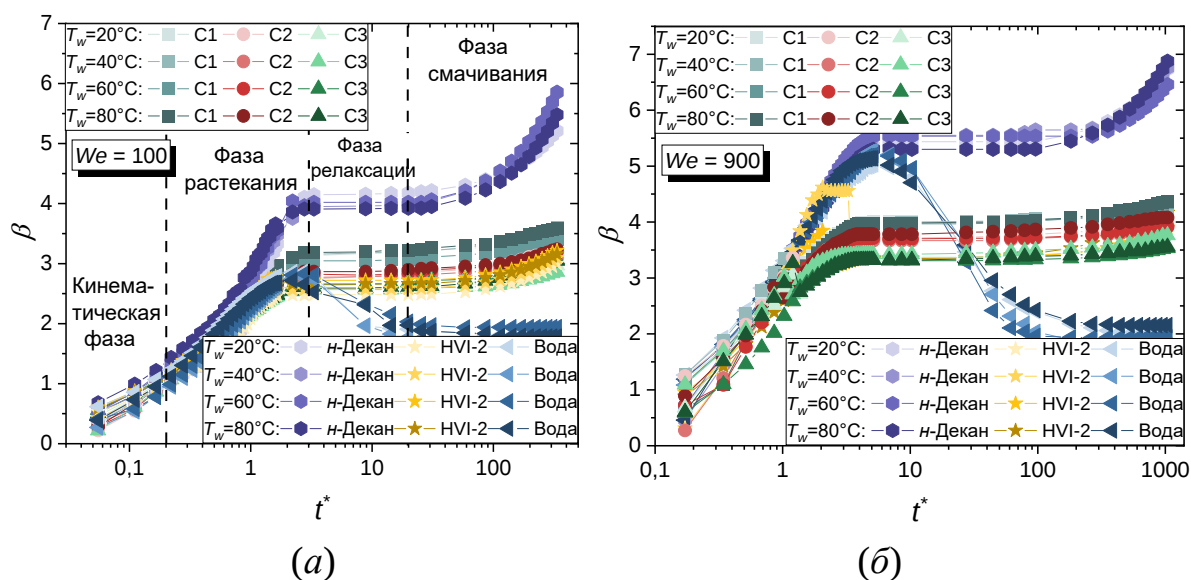


Рисунок 5 – Коэффициент растекания капли как функция от безразмерного времени при $We = 100$ (а) и $We = 900$ (б)

Согласно полученным результатам сделан следующий основной вывод. В отличие от весьма чувствительных к изменению температуры поверхности T_w^* коэффициентов растекания для капель однокомпонентных и

многокомпонентных углеводородных топлив [20], в настоящем исследовании при пленочном испарении капле рассматриваемых жидкостей, взаимодействующих с нагретой до $T_w = 20-80$ °С поверхностью, не наблюдалось заметного влияния нагрева на β . Последнее по всей видимости связано с несущественным изменением реологических и поверхностно-активных свойств исследуемых жидкостей в окрестностях пограничного слоя и в целом соответствующих движущих сил процесса растекания в таком довольно узком диапазоне температур (20-80°С). В то же время, с увеличением We во всех случаях увеличивался коэффициент максимального растекания β_{max} (рисунок 6), как и в целом коэффициент растекания β во всем диапазоне наблюдений t^* , что хорошо сочетается с известными результатами для капель однородных жидкостей [22], включая жидкие топлива [20,25].

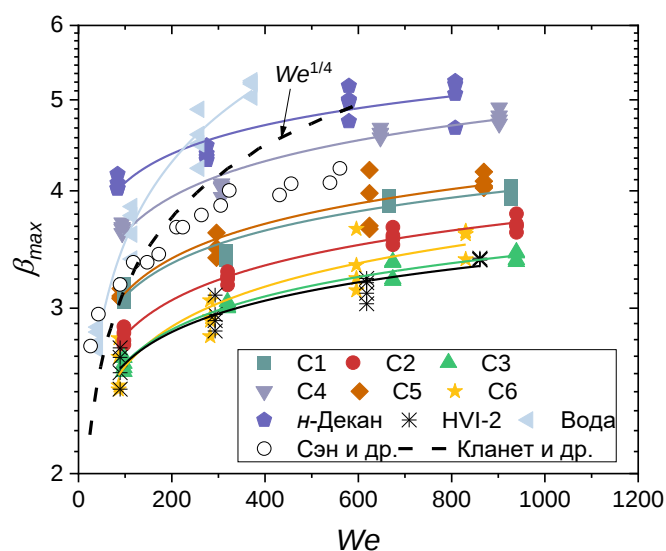


Рисунок 6 – Влияние изменения We на значения β_{max}

На рисунке 6 полученные результаты для эмульсий оказались довольно близки к значениям для капель биотоплива (смесь Jet A-1 и дизельного топлива с компонентами биологического происхождения), приведенным Сенем и др. [26]. При этом, известное в литературе выражение [27], объясняющее поведение β_{max} при изменении We для капель однородных однофазных жидкостей (воды и ртути), $\beta_{max} = We^{1/4}$, не убедительно описывает

полученные в исследовании результаты для капель эмульсий, *n*-декана и изопарафинового масла. В исследовании степенная функция для масштабирования поведения β_{max} для капель исследуемых жидкостей при изменении We (рисунок 6) имеет следующий общий вид (уравнение (1)):

$$\beta_{max} = C \cdot We^{0,12}, \quad (1)$$

где C – коэффициент, увеличивающийся при снижении вязкости жидкостей (таблица 2). Достоверность аппроксимации для капель всех исследуемых жидкостей составляла $R^2 > 0,96$.

Таким образом, значения β_{max} также зависят и от соотношения сил инерции и вязкости жидкости, исходя из однозначного поведения коэффициента C . Для того, чтобы одновременно учесть влияние сил вязкости, поверхностного натяжения и инерции в поведении коэффициента β_{max} , аналогично исследованию [20] введен безразмерный комплекс We/Oh для непосредственного масштабирования значений β_{max} (рисунок 7).

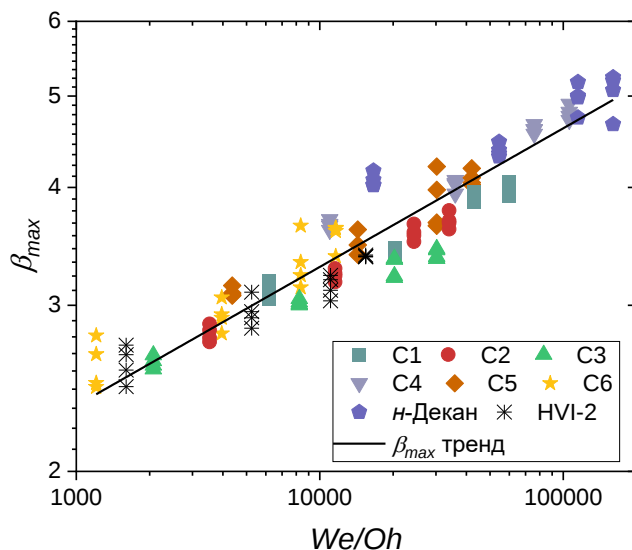


Рисунок 7 – Влияние комплексного параметра We/Oh , учитывающего основные движущие силы растекания капли, на значения β_{max}

Полученная зависимость довольно точно (относительное среднее расхождение между экспериментальными и предсказанными β_{max} составило 4,97) описывается степенной функцией вида:

$$\beta_{max} = 0,82 \left(\frac{We}{Oh} \right)^{0,15}. \quad (2)$$

В исследовании рассмотрены и другие параметры растекания капли. Минимальная высота растекающейся капли h_{min} учтена с помощью интегрального параметра максимального растекания ζ_{min}/β_{max} . Как и в случае β_{max} , установлена более выраженная зависимость параметра ζ_{min}/β_{max} от числа Re , чем от числа We , а также аналогичным образом предложено масштабирование через комплексный параметр We/Oh (рисунок 8). Полученная зависимость удовлетворительно (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,91$, относительное среднее расхождение между экспериментальными и предсказанными ζ_{min}/β_{max} составило 14.11) описывается степенной функцией в виде выражения (3).

$$\zeta_{min} / \beta_{max} = 0.79 \cdot \left(\frac{We}{Oh} \right)^{-0.35}. \quad (3)$$

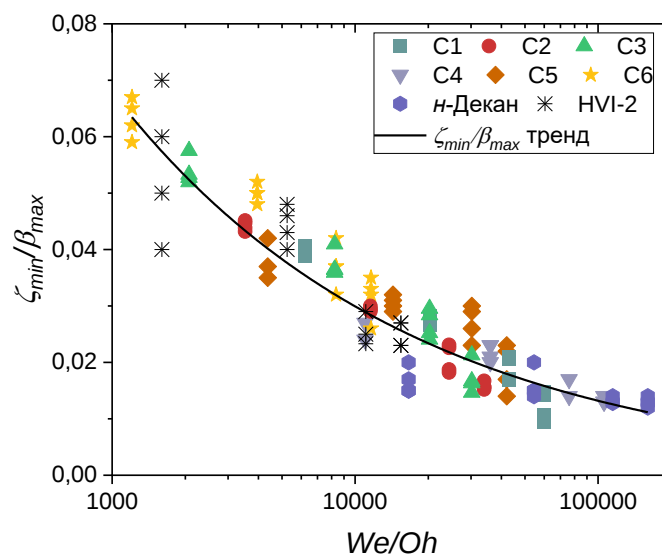


Рисунок 8 – Влияние комплексного параметра We/Oh , учитывающего основные движущие силы растекания капли, на значения интегрального параметра растекания капли жидкости ζ_{min}/β_{max}

Введение интегрального параметра максимального растекания ζ_{min}/β_{max} позволяет получить качественную оценку состояния (по существу, геометрических размеров) капель однородных и неоднородных (эмульсий) жидкостей в момент максимального растекания при пленочном испарении в условиях конвективного теплообмена, а также при заданном начальном соотношении всех основных движущих сил процесса.

1.3.3 Характеристики коронообразной структуры

В ходе исследований измерены геометрические характеристики коронообразной структуры при corona splashing [22,28,29] капель рассматриваемых эмульсий и изопарафинового масла при $We = 600$ и $We = 900$. Среди них безразмерные высота H_{cor}^* и диаметр D_{cor}^* коронообразной структуры в момент ее максимального раскрытия без учета уже сформированных к этому моменту вследствие неустойчивости «парящего» обода Тэйлора вторичных фрагментов (рисунок 3в). Эти параметры измерены в исследовании, поскольку они отражают потенциал разбрызгивания непрерывного метастабильного парящего потока жидкости.

В экспериментах очевидно наблюдалась физически правомерная закономерность увеличения H_{cor}^* и D_{cor}^* при повышенном значении We ($We=900$) (рисунок 9аб). Также установлено, что интегральный параметр $H_{cor}^{max}/D_{cor}^{max}$, учитывающий одновременно обе геометрические характеристики коронообразной структуры (рисунок 9в), удовлетворительно описывается за счет числа Re с достоверностью $R^2 = 0,72$ и относительным средним расхождением (RME) между экспериментальными и прогнозируемыми значениями $H_{cor}^{max}/D_{cor}^{max}$, равным 14,36, в виде выражения (4). Однако, более важным результатом является заметный почти линейный тренд снижения значений геометрических характеристик коронообразной структуры при росте температуры поверхности T_w^* при взаимодействии капель эмульсий (рисунок 9аб). Физически, это обозначает, что коронообразная структура существует при более низких температурах дольше (рисунок 10). Таким образом,

температура поверхности взаимодействия при конвективном теплообмене влияет на свойства жидкостей в капле, которые в свою очередь определяют время жизни короны как целостной структуры. При этом геометрические характеристики короны, как правило, увеличиваются пропорционально времени ее жизни. Для капель масла такой тренд не наблюдался.

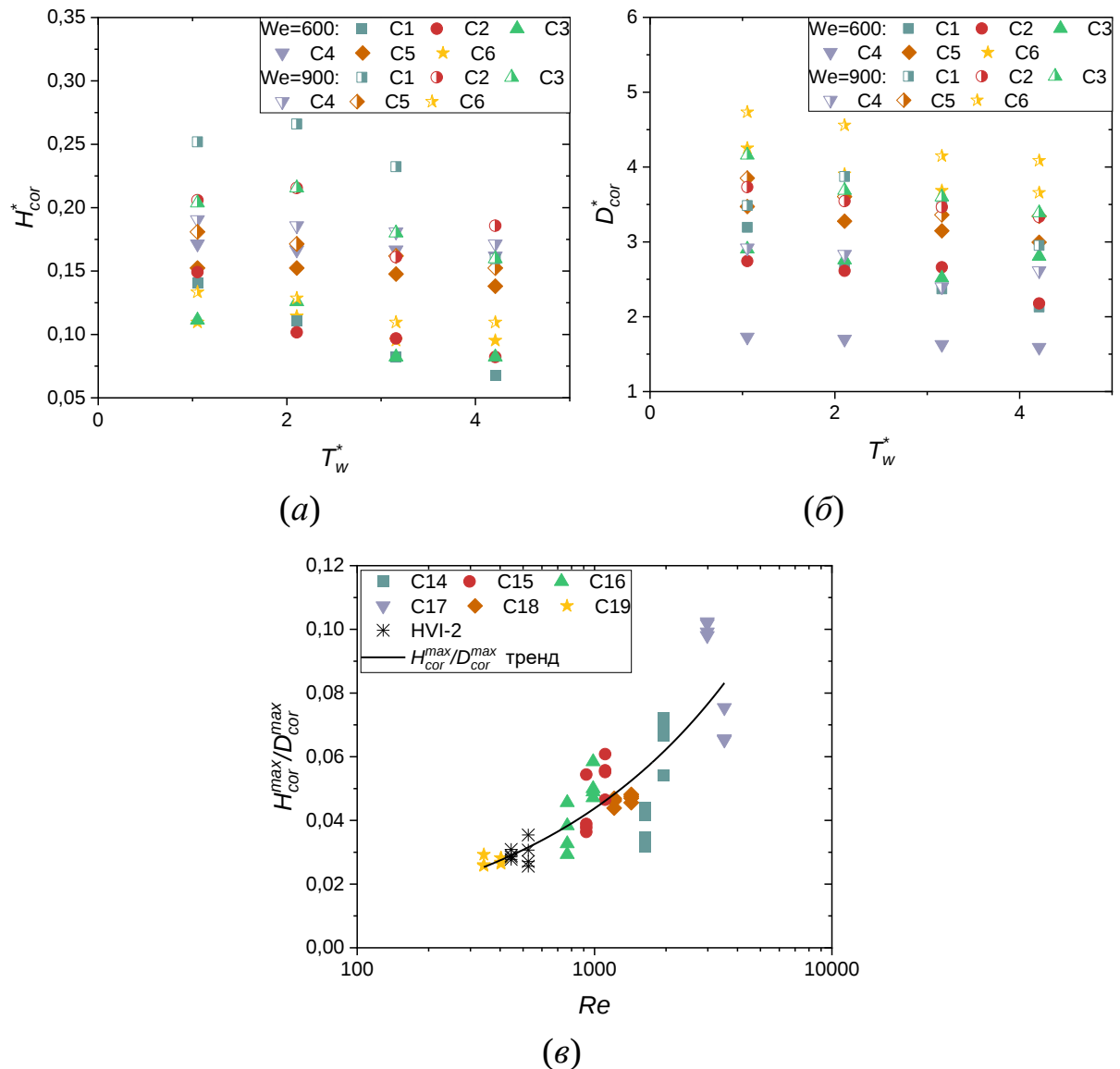


Рисунок 9 – Влияние температуры поверхности взаимодействия T_w^* на геометрические характеристики коронообразной структуры: H_{cor}^* (a) и D_{cor}^* (б); интегральный параметр геометрических характеристик короны $H_{cor}^{max}/D_{cor}^{max}$ как функция от Re (в)

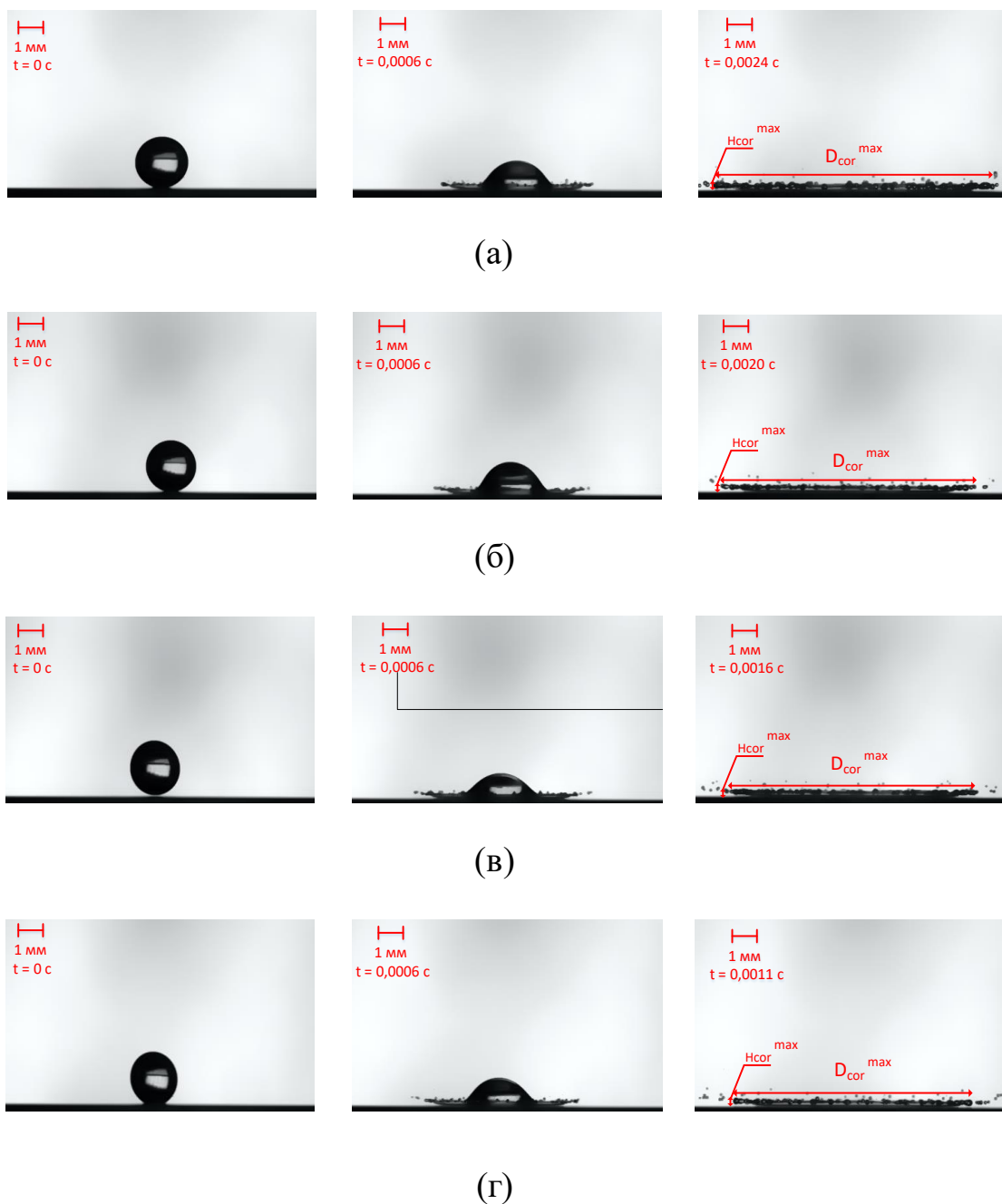


Рисунок 10 – Кадры процесса коронообразования для состава С5 при температурах поверхности: (а) 20 °С; (б) 40 °С; (в) 60 °С; (г) 80 °С.

$$H_{cor}^{max} / D_{cor}^{max} = 0,0013 \cdot Re^{0,5}. \quad (4)$$

Использование безразмерного числа Бринкмана Br в данной ситуации позволит учесть влияние кондуктивного нагрева от поверхности взаимодействия на геометрические параметры короны наряду с явным вкладом вязкости жидкости. Поскольку этот параметр, по существу, и

определяет перенос теплоты от нагретой поверхности взаимодействия к растекающейся (движущейся) вязкой жидкости [30] через отношение теплоты, произведенной за счет вязкой диссипации, к теплоте, передаваемой за счет molecular conduction (thermal conduction). На рисунке 11а наблюдается увеличение параметра D_{cor}^* при росте значений числа Br согласно степенной функции (RME=13,38), описываемой уравнением (5).

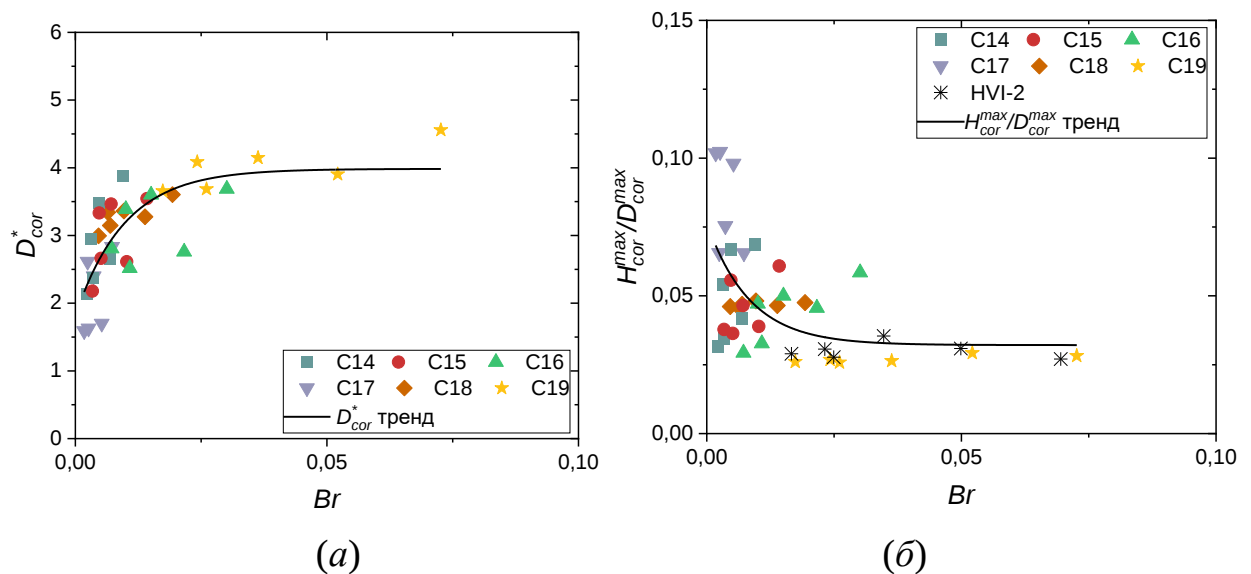


Рисунок 11 – Параметры короны D_{cor}^* (а) и $H_{cor}^{max} / D_{cor}^{max}$ (б) в зависимости от числа Br

Такое поведение объясняется тем, что рост числа Br связан с увеличением вязкости жидкости и снижением температуры поверхности взаимодействия. Последнее, как уже показано выше, способствует более длительному существованию короны в виде целостной структуры; известно, что эмульгирование в целом задерживает разбрызгивание капель из-за доминирования сил вязкости [31]. Увеличение же вязкости жидкости служит проявлением большего сопротивления к необратимой деформации и последующей неустойчивости коронообразной структуры. В таких условиях рост значений D_{cor}^* при больших числах Br становится закономерным. Аналогичные рассуждения, скорее всего, относятся и к данным на рисунке

11б. При этом, снижение значений интегрального параметра $H_{cor}^{max} / D_{cor}^{max}$ связано со сравнительно менее существенными отличиями H_{cor}^{max} для различных жидкостей при разных температурах относительно значений D_{cor}^{max} при тех же условиях (рисунок 9аб). Выражение (6) скорее качественно характеризует поведение параметра $H_{cor}^{max} / D_{cor}^{max}$ как функции от числа Br .

$$D_{cor}^* = 3.98 - 2.17 \cdot (5.2 \cdot 10^{-45})^{Br}; \quad (5)$$

$$H_{cor}^{max} / D_{cor}^{max} = 0.03 + 0.04 \cdot (3.36 \cdot 10^{-52})^{Br}. \quad (6)$$

Данные зависимости описывают поведение коронобразной структуры за счет определения отношения между энергией вязкой диссипации для потока растекающейся жидкости и энергией (теплотой), переданной жидкости от нагретой поверхности за счет molecular (thermal) conduction.

Выводы по разделу Экспериментальные исследования

Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение растекающейся капли эмульсии после ее взаимодействия с нагретой до 80 °С твердой поверхностью при $We=100-900$. Подобные знания являются актуальными при разработке системы подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону. Как показали результаты данного исследования, поведение капли многокомпонентной жидкости, которая подается в рабочую зону и взаимодействует с поверхностью, зависит от многих факторов: диаметра сопла, скорости взаимодействия, температуры поверхности взаимодействия, компонентного состава и свойств жидкости. Выведенные эмпирические зависимости позволят провести настройку АСУ таким образом, чтобы добиться необходимого для конкретной технологии исхода взаимодействия капли с поверхностью. К тому же с использованием автоматизированной системы результаты исследования могут быть масштабированы за счет расширения диапазонов скоростей взаимодействия, размеров капель и температур поверхности.

2 Проектирование АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону

2.1 Системный анализ объекта автоматизации

В качестве объекта автоматизации в данной работе выбран лабораторный стенд, предназначенный для изучения процесса взаимодействия капли многокомпонентной жидкости с нагретой поверхностью.

Цикл работы лабораторной установки состоит из нескольких этапов (рисунок 12). На первом этапе из трех отдельных емкостей в общий бак подаются компоненты рабочей жидкости: декан, масло базовое изопарафиновое HVI-2 и дистиллированная вода. С использованием датчиков расхода, а также программируемого логического контроллера (ПЛК) определяются соотношения компонентов в топливной эмульсии. Данные соотношения компонентов задаются оператором. Стабилизация полученной смеси осуществляется посредством использования эмульгатора, который заранее добавляется либо в декан, либо в воду. Далее подготовленная смесь из трех компонентов перемешивается в баке смешения с использованием ультразвуковой мешалки.

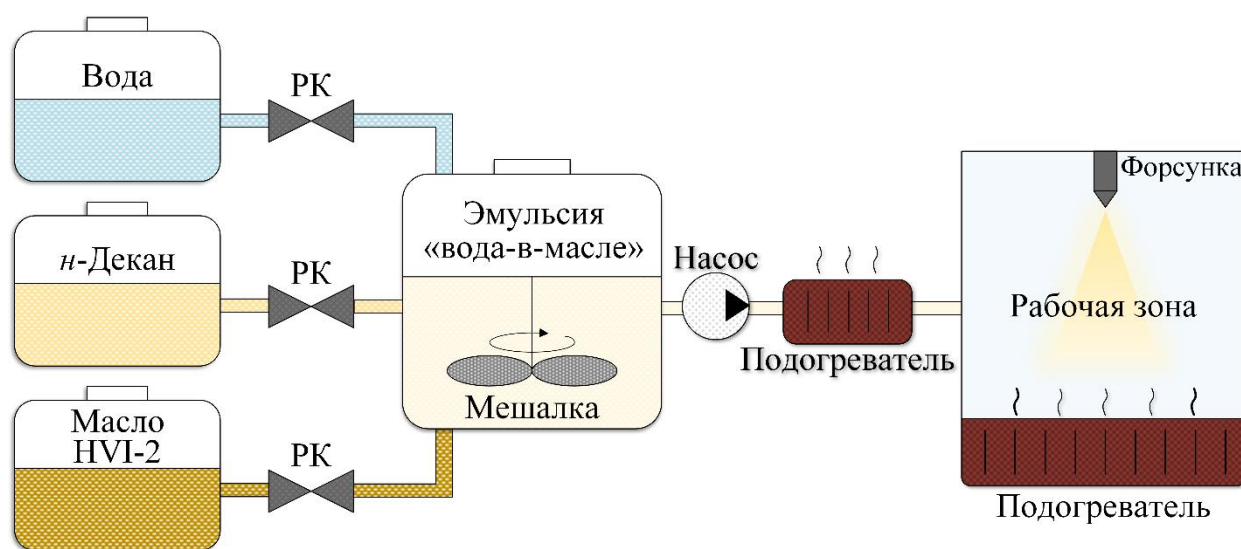


Рисунок 12 – Схема разрабатываемой АСУ ТП

На втором этапе приготовленная жидкость нагревается до нужной температуры с помощью электрического нагревателя и с использованием насоса подается через форсуночное устройство в рабочую зону. В рабочей зоне капля многокомпонентной жидкости падает под прямым углом на твердую нагретую поверхность, представляющую собой сапфировую подложку, нагреваемую снизу с использованием электрического нагревателя.

Датчики температуры установлены в характерных точках контроля исследуемых параметров. Измеряется температура рабочей жидкости на входе в рабочую зону, температура поверхности взаимодействия и температура окружающей среды в рабочей зоне. Датчики расхода установлены в магистралях подачи декана, масла, воды, а также магистрали подачи рабочей жидкости для измерения расхода данных сред. Датчик уровня установлен в баке с рабочей жидкостью во избежание работы лабораторного стенда без рабочей жидкости.

В таблице 3 приведены средства контроля и сигнализации, которыми оснащен стенд. При достижении предельно допустимых рабочих значений контролируемых и регулируемых параметров срабатывает сигнализация.

Таблица 3 – Объем оснащения лабораторного стенда средствами контроля и сигнализации

Параметр, состояние, положение	Форма представления информации			
	Постоянно	По требованию	Сигнализация	Регистрация
Температура рабочей жидкости	+		↑↓	+
Температура поверхности взаимодействия	+		↑↓	+
Температура окружающей среды		+	↑	+
Расход декана		+	↑↓	+
Расход масла		+	↑↓	+

Продолжение таблицы 3

Расход воды		+	↑↓	+
Расход рабочей жидкости	+		↑↓	+
Уровень рабочий жидкости в баке	+		↓	+
Положение регулирующего клапана 1	+			
Положение регулирующего клапана 2	+			
Положение регулирующего клапана 3	+			
Мощность нагревателя 1	+			
Мощность нагревателя 2	+			
Мощность насоса	+			
Мощность мешалки	+			

Разрабатываемая система необходима для контроля и управления процессом подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону. Для достижения сформулированных целей АСУ ТП должна выполнять во всех технологических режимах работы объекта совокупность информационно-вычислительных, расчётных и служебных функций.

2.2 Разработка структуры КТС автоматизированной системы управления

В разрабатываемой системе в качестве регулирующего устройства предлагается использовать многоканальный программируемый логический контроллер (ПЛК). Программируемый логический контроллер исключает использование блока ручного управления, задатчиков регулируемых параметров, стабилизирующего и корректирующего регуляторов, т.к. их функции может выполнять непосредственно контроллер. Сигнал по положению вала может поступать на аналоговый вход ПЛК без использования дистанционного указателя положения, т.к. в исполнительном механизме используется токовый датчик положения.

Структурная схема разрабатываемой АСУ ТП представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.011 С1.

Управление расходом компонентов исследуемой жидкости осуществляется следующим образом. Сигналы с датчиков расхода ДР1, ДР2,

ДРЗ с унифицированным выходным сигналом подаются на программируемый логический контроллер ПЛК. С помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя процессор обрабатывает сигналы и вырабатывает управляющие воздействия, подаваемые на обмотку управления исполнительными механизмами ИМ1, ИМ2 и ИМ3. Вал ИМ вращается, и, соответственно, меняется положение регулирующих клапанов РО1, РО2 и РО3. Таким образом поддерживается необходимое соотношение компонентов топлива. Управление перемешиванием многокомпонентной жидкости осуществляется с использованием ультразвуковой мешалки М.

Управление подачей жидкости в рабочую зону осуществляется с использованием насоса на основании сигнала обратной связи с расходомера, установленного в магистрали рабочей жидкости. Управление температурой рабочей жидкости осуществляется при помощи электрического нагревателя НГ1 на основании сигнала обратной связи от датчика температуры рабочей жидкости ДТ1, поступающего на ПЛК. Управление температурой рабочей поверхности осуществляется при помощи нагревателя НГ2 на основании сигнала от датчика температуры поверхности ДТ2, поступающего на ПЛК. Температура воздуха в рабочей зоне измеряется датчиком температуры ДТ3. Уровень рабочей жидкости в баке измеряется датчиком уровня ДУ.

Сигналы с ПЛК подаются на автоматизированное рабочее место АРМ, что позволяет оператору получать сведения о технологическом процессе, дистанционно управлять им, выявлять неполадки в работе оборудования и вести документацию.

2.3 Разработка функциональной схемы системы управления

Функциональная схема систем автоматизации технологических процессов является основным техническим документом, определяющим структуру и характер систем автоматизации технологических процессов, а также оснащения их приборами и средствами автоматизации.

В процессе разработки функциональной схемы выполнены следующие задачи:

- изучение схемы технологического объекта автоматизации;
- определение перечня регулируемых и контролируемых параметров и регулирование технологического процесса и оборудования;
- указание месторасположения точек отбора измерительной информации;
- определение предельно допустимых рабочих значений контролируемых и регулируемых параметров;
- выбор структуры измерительных каналов информационно-управляющей и исполнительной частей системы автоматизации: в состав структуры каналов измерительной части входит первичный преобразователь температуры без нормирующего преобразователя, в состав структуры каналов информационно-управляющей части входит ПЛК, в состав структуры исполнительной части входит исполнительный механизм;
- выбор методов и технических средств получения, преобразования, представления и передачи измерительной информации, а также технических средств выработки управляющих воздействий. Выбран контактный метод измерения температуры рабочей среды и рабочей поверхности посредством термоэлектрических преобразователей (ТЭП). Для реализации функций контроля и управления предусмотрен ПЛК;
- размещение технических средств автоматизации (ТСА) на технологическом оборудовании: первичные преобразователи температуры расположены непосредственно на технологическом оборудовании, ПЛК расположен в шкафу управления и автоматики [32,33].

Функциональная схема разрабатываемой АСУ ТП представлена листе с шифром ФЮРА.421000.011 С2.

На технологической схеме определяются измерительные каналы 1...8, 12, 14, 16, 18 и каналы управления 9, 11, 13, 15, 17, 19, 20. Измерительные

каналы 1, 2, 3 формируют сигналы о величине температуры рабочей жидкости на входе в рабочую зону, температуры поверхности взаимодействия и температуры окружающей среды в рабочей зоне, соответственно. Измерительные каналы 4, 5, 6, 7 формируют сигналы и величине расхода декана, масла, воды и рабочей жидкости соответственно. Измерительный канал 8 формирует сигнал о величине уровня жидкости в баке.

Сужающее устройство 4а устанавливается непосредственно в трубопроводе подачи декана для создания перепада давления. С использованием соединительных трубок производится отбор и передача перепада давления на измерительный преобразователь 4б. Измерительный преобразователь формирует выходной унифицированный сигнал 4...20 мА о величине расхода декана. Сигнал подается на аналоговый вход контроллера. Сужающее устройство 5а устанавливается непосредственно в трубопроводе подачи масла для создания перепада давления. С использованием соединительных трубок производится отбор и передача перепада давления на измерительный преобразователь 5б. Измерительный преобразователь формирует выходной унифицированный сигнал 4...20 мА о величине расхода масла. Сужающее устройство 6а устанавливается непосредственно в трубопроводе подачи воды для создания перепада давления. С использованием соединительных трубок производится отбор и передача перепада давления на измерительный преобразователь 6б. Измерительный преобразователь формирует выходной унифицированный сигнал 4...20 мА о величине расхода воды. Сужающее устройство 7а устанавливается непосредственно в трубопроводе подачи рабочей жидкости для создания перепада давления. С использованием соединительных трубок производится отбор и передача перепада давления на измерительный преобразователь 7б. Измерительный преобразователь формирует выходной унифицированный сигнал 4...20 мА о величине расхода рабочей жидкости. Выходные унифицированные сигналы с измерительных преобразователей 5б, 6б, 7б поступают на аналоговые входы контроллера. Измерительный

преобразователь 8а формирует выходной унифицированный сигнал 4...20 мА о величине уровня жидкости в баке. Сигнал подается на аналоговый вход контроллера.

Измерительные каналы 10, 12, 14 формируют сигналы о положениях выходного вала исполнительных механизмов, с помощью которых регулируется расход декана, масла и воды, соответственно. Измерительные каналы 16, 18 формируют сигналы о величине мощности ультразвуковой мешалки и насоса соответственно.

Каналы управления 9, 11, 13 формируют управляющее воздействие для изменения положения задвижек. Каналы управления 15, 17 формируют управляющее воздействие для включения и выключения мешалки и насоса соответственно. Каналы управления 19, 20 формируют управляющее воздействие для включения и выключения электрических нагревателей.

Для управления расходом декана с выхода контроллера подается сигнал управления на пусковое устройство 9а. Пусковое устройство 9а подает напряжение питания на привод исполнительного механизма 9б. Исполнительный механизм 9б воздействует на регулирующий орган, расположенный в трубопроводе подачи декана, путем его поворота. Аналогичным образом происходит управление расходами масла и воды. С выхода контроллера подаются сигналы управления на пусковые устройства 11а и 13а. Пусковые устройства подают напряжение питания на приводы соответствующих исполнительных механизмов 11б и 13б. Исполнительные механизмы воздействуют на регулирующие органы, расположенные в трубопроводах подачи масла и воды соответственно.

Для управления включением/отключением мешалки и насоса с выхода контроллера подаются сигналы управления на пусковые устройства 13а и 15а соответственно. Пусковые устройства подают напряжение питания на приводы соответствующих исполнительных механизмов 13б и 15б. Исполнительные механизмы воздействуют на мешалку и насос соответственно. Для управления включением/отключением двух

электрических нагревателей с выхода контроллера подаются сигналы управления на блоки управления нагревом.

Линии связи, выведенные от первичных измерительных преобразователей, регулирующих органов и исполнительных механизмов, идут к щиту управления, включающему в свой состав контроллер. От контроллера информация в режиме реального времени передается на верхний уровень, т.е. на автоматизированное рабочее место для дистанционного управления технологическим процессом.

2.4 Составление опросных листов на приборы и средства автоматизации

Опросные листы на ТСА необходимы при разработке системы автоматизации, поскольку между выбором оборудования и его закупкой/внедрением может пройти достаточно большой период времени, за который выбранное оборудование может быть снято с производства, либо могли появиться более подходящие по тем или иным критериям варианты. Наличие опросных листов позволяет быстро осуществить подбор альтернативного оборудования, ориентируясь на ранее заложенные в них требования. Опросные листы на используемые средства контроля технологических параметров представлены в Приложении А.

2.5 Выбор технических средств системы управления, составление спецификации

Система регулирования теплотехнических параметров должна проектироваться, как правило, на основе технических средств автоматизации, серийно выпускаемых отечественными предприятиями. Предпочтение должно отдаваться унифицированным системам и однотипным техническим средствам, обеспечивающим взаимозаменяемость, простоту сочетания друг с другом и удобство компоновки на щитах.

В процессе выбора первичных измерительных преобразователей необходимо учитывать предельные значения измеряемого параметра и

давлений, в диапазоне которых можно применять различные первичные измерительные преобразователи, а также характеристики выходного сигнала первичных измерительных преобразователей. Необходимо ограничивать количество технических средств, устанавливаемых на щитах, минимальным набором, обеспечивающим выполнение требуемых функций.

2.5.1 Выбор технических средств измерения температуры

В разрабатываемой АСУ ТП подачи жидкости в рабочую зону регистрируется температура жидкости, температура поверхности взаимодействия и температура окружающей среды в рабочей зоне.

Главными требованиями для датчиков, используемых для измерения температуры жидкости, температуры поверхности и температуры в рабочей зоне, являются диапазон измерения, цена и надежность. Требуемый диапазон измерений температуры $0 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Рассмотрим технические характеристики термопреобразователей сопротивления типа Овен ДТС.И «Овен» [34] Метран-274 «Метран» [35] и ТС-1088 «Элемер» [36] (Таблица 4).

Таблица 4 – Основные технические характеристики термоэлектрических преобразователей

Наименование	Тип датчика	НСХ	Диапазон измерения	Выходной сигнал	Предел допускаемой основной приведенной погрешности, %
Термопреобразователь сопротивления	Овен ДТС.И	50М	$0 \dots +150 \text{ }^{\circ}\text{C}$	4...20 мА	$\pm 0,5$
Термопреобразователь сопротивления	Метран-274	50М	$0 \dots +100 \text{ }^{\circ}\text{C}$	4...20 мА	$\pm 0,5$
Термопреобразователь сопротивления	ТС-1088	50М	$-40 \dots +200 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Электрическое сопротивление	± 1

Технические характеристики датчиков схожи, однако класс допуска первых двух датчиков ниже, чем у датчика ТС-1088, что является преимуществом. Диапазон измерений датчика типа Овен ДТСМ.И наиболее подходящий, так как необходимо, чтобы максимальное значение диапазона

измеряемой температуры не превышало 75% от верхнего значения диапазона измерений преобразователя.

Следовательно, выберем три датчика типа Овен ДТСМ.И для измерения температуры жидкости, температуры поверхности взаимодействия и температуры окружающей среды в рабочей зоне.

2.5.2 Выбор технических средств измерения расхода

Для измерения расхода декана, масла, воды и многокомпонентной жидкости необходимо установить расходомер в магистраль подачи жидкости в рабочую зону. Требуемый диапазон измерения расхода 0...10 л/ч. В таблице 5 представлены основные технические характеристики следующих расходомеров: расходомер переменного перепада давления Метран 150RFA («Метран») [37], расходомер переменного перепада давления Rosemount 3051SFA («Emerson») [38] и электромагнитный расходомер Promag 53P «Endress+Hauser» [39].

Таблица 5 – Основные технические характеристики расходомеров

Наименование	Тип датчик	Измеряемые среды	Выходной сигнал	Предел допускаемой основной приведенной погрешности, %
Расходомер переменного перепада давления	Метран 150RFA	Жидкость, газ, пар	4...20 мА	±2,5
Расходомер переменного перепада давления	Rosemount 3051SFA	Жидкость	4...20 мА	±0,8
Ультразвуковой расходомер	US-800	Жидкость	4...20 мА	±0,5

Среди представленных расходомеров выбран расходомер переменного перепада давления типа Rosemount 3051SFA (четыре штуки), так как предел допускаемой основной приведенной погрешности у него ниже, чем у расходомера переменного перепада давления типа Метран 150RFA, и цена ниже, чем у ультразвукового расходомера US800.

2.5.3 Выбор технических средств измерения уровня

Для измерения уровня многокомпонентной эмульсии необходимо установить в баке с рабочей жидкостью уровнемер. Требуемый диапазон измерения расхода 0...100 л. В таблице 6 представлены основные технические характеристики следующих уровнемеров: поплавковый уровнемер типа ПДУ-И («Овен») [40], и ультразвуковой уровнемер типа ЭЛЕМЕР-УРЗ_41 «Элемер» [41].

Таблица 6 – Основные технические характеристики уровнемеров

Наименование	Тип датчик	Измеряемые среды	Выходной сигнал	Предел допускаемой основной приведенной погрешности, %
Поплавковый уровнемер	ПДУ-И	Жидкость, газ, пар	4...20 мА	±2,5
Ультразвуковой уровнемер	ЭЛЕМЕР-УРЗ-41	Жидкость	4...20 мА	±0,25

Для измерения уровня рабочей жидкости в баке выбран ультразвуковой уровнемер типа ЭЛЕМЕР-УРЗ-41, так как предел допускаемой основной приведенной погрешности у него ниже, чем у поплавкового уровнемера типа ПДУ-И. К тому же ультразвуковой уровнемер производит измерения бесконтактным способом, что является преимуществом.

2.5.4 Выбор исполнительного механизма

Исполнительный механизм – это устройство, предназначенное для преобразования сигнала регулятора в перемещение регулирующего органа. Существует несколько типов ИМ: МЭО – однооборотный, МЭОФ – однооборотный фланцевый, МЭП – прямоходный постоянной скорости, МЭПК – прямоходный кривошипный постоянной скорости. При выборе типа ИМ следует руководствоваться видом регулирующего органа и крутящего момента. В настоящей работе предлагается использование запорно-регулирующего крана (МЭО), управляющего интенсивностью потока топлива.

Выберем ИМ типа МЭО-16/10-0,25У-15, электроисполнительный однооборотный механизм с номинальным значением момента на выходном валу 16 Н · м, номинальное значение времени полного хода 10 с.

2.5.5 Выбор регулирующего устройства

В качестве регулирующего устройства используется контроллер. В данной работе рассматривались три контроллера от различных производителей: Элсима-M01 («Элеси») [42], ПЛК-73 («Овен») [43] и SIMATIC S7-200 («Siemens») [44]. В таблице 7 приведены основные технические характеристики контроллеров.

Таблица 7 – Технические характеристики сравниваемых контроллеров

Параметры	Элсима-M01	ПЛК73	S7-200
Центральный процессор	Cortex ARM8	32-разрядный RISC процессор	CPU221
Напряжение питания от источника постоянного тока, В	20...28	От 90 до 245	24
Потребляемая мощность, Вт, не более	7	12	-
Рабочая температура, °С	0...60	-15...55	0...55
Параметры	Элсима-M01	ПЛК-73	S7-200
Атмосферное давление, кПа	84...106,7	84... 106,7	84...106,7
Параметры	Элсима-M01	ПЛК73	S7-200
Средний срок службы, лет, не менее	12	7	-
Дискретные входы	20	8	8
Аналоговые входы	4	8	0
Интерфейсы	RS-485, Ethernet	RS-232, RS-485	RS-485
Протоколы	Modbus RTU, Modbus TCP/IP, IEC	ОВЕН, MODBUS PRU, MODBUS PRU ASCII, GateWay (протокол CoDeSys)	Modbus RTU, Modbus MPI, Modbus USS

Программируемый логический контроллер ПЛК73 имеет в своем составе набор необходимых модулей:

- модуль питания РМ 1207;
- модуль вывода аналоговых сигналов МУ110-224.8И;
- модуль ввода аналоговых сигналов МВ110-224.8А.

Выбранные технические средства, необходимые для реализации проектируемой системы, приведены в заказной спецификации, представленной на листе с шифром ФЮРА.421000.011.СО1.

2.6 Разработка принципиальной электрической схемы шкафа автоматизации

Принципиальные электрические схемы автоматизации являются проектными документами, расшифровывающими принцип действия и работы узлов, устройств и систем автоматизации, работающих от источника электрической энергии.

Принципиальные электрические схемы определяют полный состав приборов, аппаратов и устройств (а также связей между ними), действие, которое обеспечивает решение задач управления, регулирования, защиты, измерения и сигнализации.

Эти схемы служат также для монтажа щитов управления и необходимы при производстве пуско-наладочных работ и в эксплуатации. Принципиальные электрические схемы служат основанием для разработки других документов проекта:

- монтажных таблиц щитов и пультов;
- схем внешних соединений и др.

На принципиальной схеме изображают все электрические элементы или устройства, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, все электрические связи между ними, а также электрические элементы, которыми заканчиваются входные и выходные цепи [45].

Принципиальная электрическая схема измерительных каналов АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону представлена на листах с шифром ФЮРА.421000.011 ЭЗ.

На первом листе изображена схема обеспечения питанием всех элементов, размещенных в шкафу. Шкаф автоматизации питается от однофазной цепи переменного тока с напряжением 220 В. Для защиты электрической цепи от перегрузки и токов короткого замыкания в шкаф устанавливаются автоматические выключатели QF1, QF2. Источник бесперебойного питания G1 – EF A UPS 1AC/24 DC-4 обеспечивает непрерывное питание подключенного оборудования. Модули контроллера и вторичные измерительные разделительные преобразователи UY1...UY12, расположенные в шкафу, питаются через блоки бесперебойного питания 24В.

На втором листе изображен ввод на модули программируемого логического контроллера полевых измерительных сигналов – унифицированных аналоговых сигналов. Для обеспечения гальванического разделения непрерывных сигналов предполагается применение преобразователей измерительных разделительных – ЕТ 422 (производства АО "ЭлеСи", Российская Федерация). Каждый унифицированный сигнал 4...20 мА заводится на отдельный токовый ввод разделительного преобразователя (по два сигнала на одно устройство, т.к. ЕТ 422 – двухканальный). От выходов измерительных преобразователей сигнал направляется на модуль центрального процессора А1 и на модуль аналогового ввода контроллера АЗ.

На этом же листе показан ввод дискретных входных сигналов. Разработанная подсистема обеспечивает ввод дискретных сигналов состояния на модуль центрального процессора А1. Для обеспечения безопасности контроллера произведена гальваническая развязка входных дискретных сигналов с помощью контактно-релейной схемы.

Также на втором листе показана разработанная принципиальная электрическая схема подсистемы управления исполнительными механизмами

регулирующих органов, нагревателей, насоса и мешалки. Разработанная подсистема обеспечивает вывод управляющих воздействий с модуля центрального процессора А1 и модуля аналогового вывода А2. Для вывода управляющих воздействий предусмотрена гальваническая развязка цепей с использованием преобразователей измерительных разделительных ЕТ 422.

Основные характеристики аппаратов схемы записывают в перечень, оформленный в виде таблицы и заполненный сверху вниз, где указаны номера позиций по заказной спецификации, обозначения по принципиальной электрической схеме, наименование, тип, количество аппаратов, техническая характеристика и примечания [46].

На отдельном листе с шифром ФЮРА.421000.011 ПЭ представлен перечень элементов принципиальной схемы измерительных каналов АСУ. Заполнение таблицы выполнено в соответствии с принципиальной электрической схемой измерительных каналов АСУ. В перечень элементов вписаны вся аппаратура и приборы данной схемы, а именно: программируемый логический контроллер, источник бесперебойного питания, преобразователи измерительные разделительные, автоматические выключатели, розетка однофазная, блоки зажимов.

2.7 Проектирование схемы монтажной внешних проводок

Схема монтажная внешних проводок – это комбинированная схема, на которой показывают электрические и трубные связи между приборами и средствами автоматизации, установленными на технологическом оборудовании, вне щитов и на щитах, а также подключения проводок к приборам и щитам. Схема монтажная внешних проводок выполняется на основании следующих материалов:

- функциональная схема;
- общий вид щита управления;
- принципиальная схема
- спецификация оборудования и средств автоматизации.

Предварительными этапами по выполнению схемы внешних проводок являются: проверка наличия всех отборных устройств, необходимых для установки первичных измерительных преобразователей на трубопроводах и оборудовании, размещение на чертежах мест установки индивидуальных внешитовых приборов и местных щитов, расположенных в щитовых помещениях [47].

Схемы соединений выполняют без соблюдения масштаба на одном или нескольких листах формата не более А1 по ГОСТ [48]. Действительное пространственное расположение устройств и элементов схем либо не учитывается вообще, либо учитывается приближенно. Толщина линий, изображающих устройства и элементы схем, в том числе кабели, провода, трубы, должна быть от 0,4 до 1 мм. На схемах должно быть наименьшее число изломов и пересечений проводок. Расстояние между соседними параллельными проводками, а также между соседними изображениями приборов и средств автоматизации должно быть не менее 3 мм [47].

Схема монтажная внешних проводок проектируемой АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.011 С4.

В верхней части схемы расположена таблица с обозначениями измеряемых параметров, измеряемой среды, мест установки и позиционного обозначения измерительных приборов. Ниже расположены условно изображенные датчики температуры рабочей жидкости, температуры поверхности, температуры окружающей среды и уровня рабочей жидкости, от которых отходят кабели, обозначенные на чертеже линиями, а также чувствительные элементы, от которых отходят импульсные трубки, предназначенные для передачи величины перепада давления на измерительный преобразователь. Прописано марка кабеля, сечение жилы, количество жил, а также протяженность. От каждого датчика температуры или уровня каждый измеряемый параметр передается в виде унифицированного аналогового сигнала 4...20 мА по двухпроводной схеме. Линии, проведенные

от датчиков, соединены с прямоугольником, обозначающим шкаф автоматизации, через клеммные соединительные коробки. Условно изображены и пронумерованы клеммы, к которым подходят линии от датчиков. В правой части чертежа расположены условно изображенные устройства и механизмы, предназначенные непосредственно для регулирования технологического параметра, путем подачи на них сигналов управления. Показано управление положением задвижки, а также управление насосом, нагревателями и мешалкой. Также проведены линии до шкафа автоматизации, обозначающие кабели, прописаны их характеристики. Для электропроводок систем автоматизации применяются изолированные провода и кабели с алюминиевыми и медными жилами. В цепях измерения, управления, питания, сигнализации и т.п. (в том числе в цепях телемеханических устройств) допускается применять провода и кабели с медными жилами.

Помимо требований к материалу проводников (медь и алюминий) и допустимым сечениям при выборе проводов и кабелей особое внимание должно уделяться соответствию их технических данных условиям окружающей среды. Необходимо, чтобы изоляция, защитные оболочки и наружные покровы проводов и кабелей отвечали условиям окружающей среды и принятому способу выполнения электропроводки. При выборе проводов и кабелей необходимо учитывать резерв жил [49].

Исходя из этого, в качестве кабелей, идущих от датчиков, выбраны кабели КВВГ 2х0,75 – контрольные кабели с медной жилой, изоляцией и оболочкой из ПВХ. Сечение жилы – 0,75 мм², количество жил – 2. От клеммных соединительных коробок до шкафа автоматизации идет кабель КВВГнг 6х1 – контрольные кабели с медной жилой, изоляцией и оболочкой из ПВХ пониженной горючести. Сечение жилы – 1 мм², количество жил – 6. Для организации разводки сети питания внешних устройств предполагается использовать кабель КРВГЭ 3х2,5, так как данный тип кабеля предназначен для соединения электрических устройств и оборудования [45,46].

2.8 Разработка сборочного чертежа шкафа автоматизации

Сборочный чертёж представляет собой один из элементов конструкторской документации, который содержит графическую и текстовую информацию обо всех деталях, входящих в состав какого-либо изделия. Является одним из основополагающих документов в процессе создания АСУ ТП, поскольку на основании него собирается шкаф автоматизации.

Сборочный чертеж (габаритный чертеж) в автоматизации создает полное представление о том, какой состав имеет сборочная единица, а также каково ее функциональное назначение.

Кроме того, сборочные чертежи содержат информацию о геометрическом расположении объемных элементов внутри шкафа, что позволяет выявить конфликты при взаимном расположении оборудования.

Целью данного этапа является составление комплекта чертежей, необходимых для изготовления щита, монтажа технических средств автоматизации, электрических проводок и эффективной эксплуатации средств автоматизации. Учитывая конструктивные особенности, а также степень защиты от прикосновения к токоведущим частям, в операторском помещении разместим для монтажа средств автоматизации разрабатываемой системы управления климатом, выберем щит Rittal CM 2144.500 [50]. Щиты Rittal предназначены для размещения аппаратуры управления, сигнализации и автоматики. Конструкция щитов представляет собой металлический сборный корпус напольного исполнения. Подвод кабелей осуществляется снизу. Степень защиты щита от пыли и влаги: IP55.

Сборочный чертеж шкафа автоматизации представлен на листах с шифром ФЮРА.421000.011 СБ.

Блоки контроллера А1-А5 монтируются на основной крепежной панели в верхней части шкафа автоматизации. Ниже расположены источник бесперебойного питания G1. Ниже расположены преобразователи измерительные разделительные и реле. В нижней части панели щита расположены клеммные блоки ХТ-DO, ХТ-DI, ХТ-AO, ХТ-AI1, ХТ-AI2.

На боковой панели расположены автоматические выключатели QF1, QF2 и розетка XS1 на 220 В для удобства обслуживания оборудования.

На обратной стороне двери расположены кнопки с подсветкой SB1-SB15 и переключатели с ключом SA1-SA5.

Также в шкафу предусмотрены концевой выключатель SQ1, лампа накаливания EL1 и вентилятор M1.

Все блоки, входящие в состав системы предназначены для монтажа на стандартную рейку DIN-35.

Перечень составных частей шкафа автоматизации приведен на листах с шифром ФЮРА.421000.011 СО1.

3 Разработка экранных форм мнемосхем SCADA-системы

Мнемосхема представляет собой графическое изображение функциональной схемы управляемого или контролируемого объекта. Таким образом, схема может описывать технологический процесс с программным управлением. Мнемосхема предназначена для работы оператора с производственным процессом, в процессе управления мнемосхема является источником информации о текущем состоянии системы, характере и структуре протекающих в ней процессов.

Требования, предъявляемые к мнемосхеме, устанавливает предприятие, для которого она предназначена. В данной работе схема разрабатывалась в соответствии с общими требованиями:

- мнемосхема должна содержать только те элементы, которые необходимы оператору для контроля и управления объектом;
- отдельные элементы или группы элементов, наиболее существенные для контроля и управления, должны выделяться размерами, формой, цветом;
- форма и размеры панели должны обеспечивать оператору однозначное зрительное восприятие всех необходимых ему информационных элементов.

В соответствии с вышеизложенными требованиями была разработана мнемосхема АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в камеру сгорания, которая приведена на рисунке 13.

Уровень SCADA представлен на рисунке 13. Данный уровень предназначен для обеспечения необходимых условий взаимодействия капли с поверхностью. На мнемосхеме присутствуют упрощенная схема экспериментального стенда (1), входные параметры (2), задаваемые оператором, датчики температуры жидкости и температуры подложки (3), кнопки управления (4), сигнализация (5), кнопки перехода на уровни MES и ERP (6), а также тренд для визуализации процесса растекания капли (7).

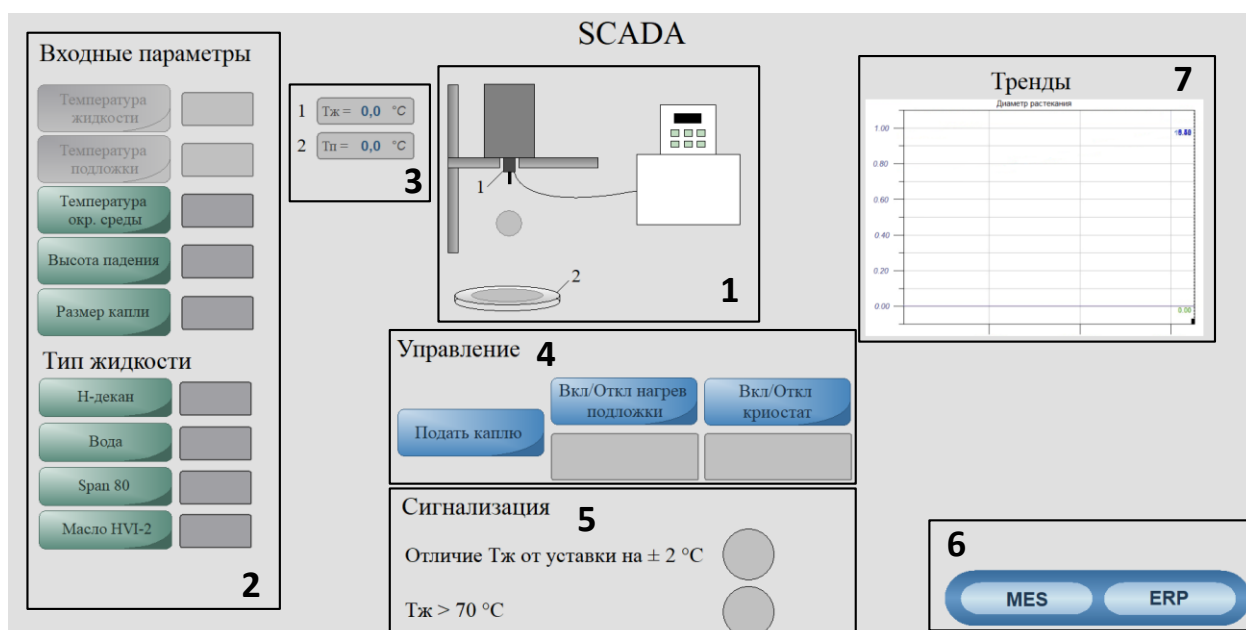


Рисунок 13 – Мнемосхема АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону

При нажатии кнопок «Вкл/Откл нагрев подложки» и «Вкл/Откл криостат» включается соответствующее оборудование, загорается соответствующее табло, и становится доступным выбор температуры жидкости и температуры подложки. Также есть возможность выбора температуры окружающей среды, высоты падения и размера капли, а также типа жидкости.

При выборе температуры жидкости производится сравнение сигнала задания с текущим значением температуры жидкости. В случае отклонения текущего значения температуры от уставки срабатывает сигнализация. При превышении определенного значения температуры также срабатывает сигнализация.

При нажатии кнопки «Подать каплю» генерируется капля. Зависимость диаметра растекания от времени отображается в окне тренда в режиме реального времени.

4 Расчет параметров настройки регулятора

4.1 Идентификация объекта управления

Идентификация объекта управления выполняется для получения математической модели объекта управления. При разработке новых технологий, применяемых на промышленных объектах, используется активная идентификация. При активной идентификации на объект подаются заранее известные возмущающие воздействия и регистрируется выходная величина.

В настоящей работе для получения кривой разгона используется модель изменения температуры многокомпонентного топлива посредством его подогрева. Математическая модель построена на основе технических характеристик устройства. Известно, что данный топливозаборник подогревает топливо до 40...65 °С за 5...10 минут. Полученная кривая разгона представлена в виде зависимости температуры эмульсионного топлива T от времени τ (рисунок 14).

По полученной кривой разгона определяем динамические параметры объекта: постоянную времени объекта T , время запаздывания объекта τ и коэффициент передачи объекта k .

Передачная функция представляет собой два последовательно соединенных звена: апериодическое звено и звено запаздывания:

$$W(P) = \frac{k}{(TP + 1)} e^{-P\tau}, \quad (7)$$

где k – коэффициент передачи объекта;

T – постоянная времени объекта;

τ – время запаздывания объекта;

P – оператор Лапласа.

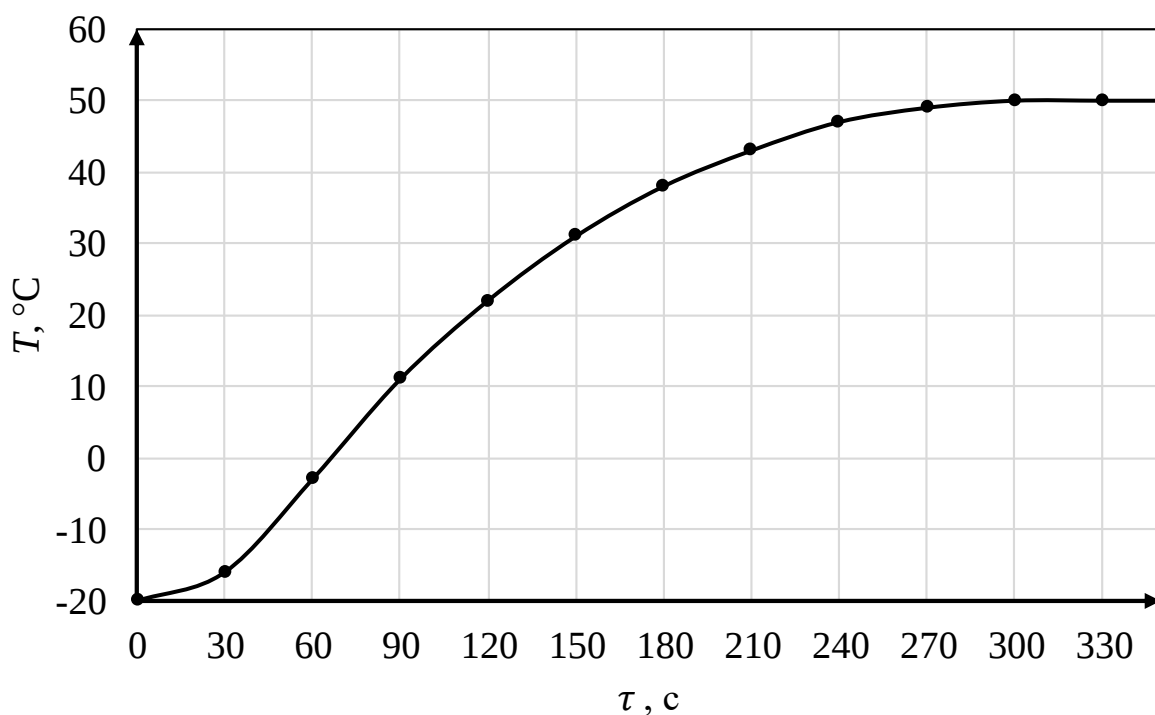


Рисунок 14 – Кривая разгона объекта управления
(τ – время, T – температура эмульсионного топлива)

При нулевых начальных условиях решение уравнения представляет собой:

$$\begin{cases} h(t) = 0 & 0 \leq t \leq \tau, \\ h(t) = h(\infty) \left[1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right] & t > \tau. \end{cases} \quad (8)$$

Данная система имеет два неизвестных: время запаздывания объекта τ и постоянную времени объекта T .

Коэффициент передачи объекта определяется по формуле:

$$k = \frac{h(T_y)}{A}, \quad (9)$$

где A – выходное воздействие.

На кривой разгона строим две точки A и B (рисунок 15). Ординаты точек A и B определяются как $h_A = 0,33 \cdot k$ и $h_B = 0,7 \cdot k$ соответственно. Абсциссы t_A и t_B – значения времени при соответствующих точках на кривой. Затем

постоянная времени объекта T и время запаздывания объекта τ вычисляются по формулам:

$$T = \frac{t_A - \tau}{\ln(1 - h_A)}, \quad (10)$$

$$\tau = \frac{t_B \cdot \ln(1 - h_A) - t_A \cdot \ln(1 - h_B)}{\ln(1 - h_A) - \ln(1 - h_B)}. \quad (11)$$

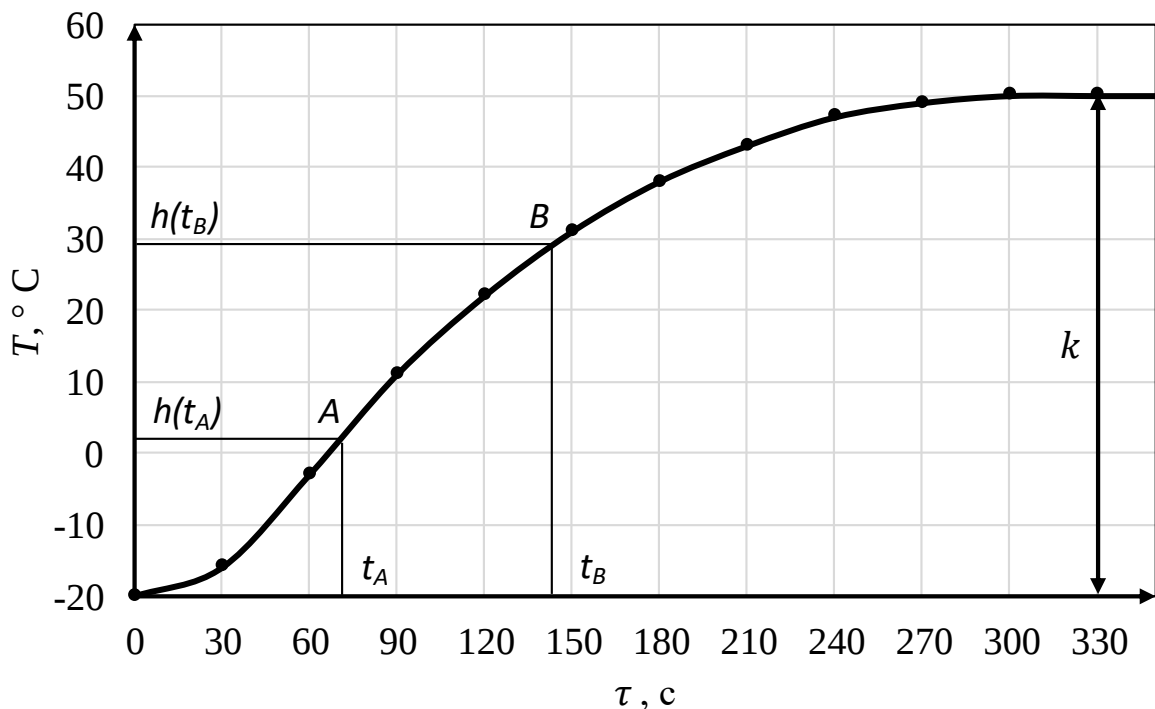


Рисунок 15 – Определение точек A и B на кривой разгона для расчета параметров регулятора

Для наглядности и точности производится аппроксимация кривой по методу Орманна. Постоянная времени объекта T и время запаздывания объекта τ вычисляются по формулам:

$$T = \frac{t_B - \tau}{1,2} = 1,25 \cdot (t_B - t_A), \quad (12)$$

$$\tau = 0,5 \cdot (3t_A - t_B). \quad (13)$$

Определяем значения по кривой разгона:

$$T = 1,25 \cdot (142 - 75) = 90 \text{ с},$$

$$\tau = 0,5 \cdot (3 \cdot 75 - 142) = 35 \text{ с.}$$

Тогда, передаточная функция примет вид:

$$W(P) = \frac{70}{(90P + 1)} e^{-35P}.$$

4.2 Расчет параметров настройки регулятора

На рисунке 16 представлен вид структурной схемы системы управления.

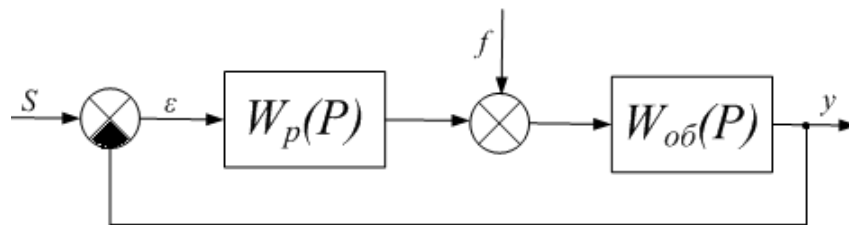


Рисунок 16 – Структурная схема системы управления

Для расчёта и построения границы заданного запаса устойчивости АСУ с ПИ-регулятором воспользуемся корневым методом параметрического синтеза систем автоматического управления с применением расширенных амплитудно-фазово-частотных характеристик (РАФЧХ).

Для системы управления установлены следующие требования к запасу устойчивости системы: степень затухания переходного процесса в системе $\psi = 0,8$.

Существует зависимость между степенью затухания переходных процессов в заданной системе управления ψ и степенью колебательности переходных процессов в заданной системе регулирования m . Следовательно, можно определить значение степени колебательности m по формуле:

$$m = -\frac{1}{2\pi} \cdot \ln(1 - \psi). \quad (14)$$

Получим:

$$m = -\frac{1}{2\pi} \cdot \ln(1 - 0,8) = 0,256.$$

Передаточная функция объекта управления определяется по формуле:

$$W_{об}(P) = \frac{K}{\prod_{i=1}^n (T_i P + 1)} \cdot e^{-P\tau}, \quad (15)$$

где P – оператор Лапласа.

Если порядок объекта $n = 1$, то выражение примет вид:

$$W_{об}(P) = \frac{K}{(TP + 1)} \cdot e^{-P\tau}. \quad (16)$$

По исходным данным определяем значения неизвестных параметров:
 $k = 70$, $\tau = 35$ с, $T = 90$ с.

После подстановки значений вышеприведенных параметров получаем окончательное выражение для передаточной функции объекта управления:

$$W(P) = \frac{70}{(90P + 1)} \cdot e^{-35P}.$$

Определим расширенные частотные характеристики объекта управления. РАФЧХ какого-либо звена можно получить подстановкой в передаточную функцию этого звена $W(p)$ оператора $p = -m \cdot \omega + i \cdot \omega$ или $p = -\eta + i \cdot \omega$.

В первом случае получим расчетные формулы для определения границы заданной степени колебательности системы m , а во втором – расчетные формулы для определения границы заданной степени устойчивости η .

Воспользуемся первым вариантом и подставим оператор $p = -m \cdot \omega + i \cdot \omega$ в выражение для передаточной функции объекта регулирования. Получим выражение для РАФЧХ объекта управления:

$$W_{об}(m, i \cdot \omega) = \frac{70 \cdot e^{-35(-m \cdot \omega + i \cdot \omega)}}{(90 \cdot (-m \cdot \omega + i \cdot \omega) + 1)}.$$

Используя формулу Эйлера $e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi$, преобразовываем выражение:

$$W_{o\bar{o}}(m, i \cdot \omega) = \frac{70 \cdot e^{-35 \cdot (-m \cdot \omega + i \cdot \omega)}}{(90 \cdot (-m \cdot \omega + i \cdot \omega) + 1)} =$$

$$= \frac{70 \cdot e^{35 \cdot m \omega} \cdot (\cos(35\omega) - i \cdot \sin(35\omega))}{(90 \cdot (-m \cdot \omega + i \cdot \omega) + 1)}.$$

С помощью программы Mathcad рассчитывается РАФЧХ объекта в диапазоне изменения частоты ω от 0 до $0,05 \text{ с}^{-1}$ с шагом по частоте $\Delta\omega = 0,002 \text{ с}^{-1}$.

Расширенная вещественная частотная характеристика (РВЧХ):

$$\text{Re}_{o\bar{o}}(m, \omega) = \text{Re}(W_{o\bar{o}}(m, i \cdot \omega)). \quad (17)$$

Расширенная мнимая частотная характеристика (РМЧХ):

$$\text{Im}_{o\bar{o}}(m, \omega) = \text{Im}(W_{o\bar{o}}(m, i \cdot \omega)). \quad (18)$$

Расширенная амплитудно-частотная характеристика (РАЧХ):

$$A_{o\bar{o}}(m, \omega) = \sqrt{\text{Re}_{o\bar{o}}^2(m, \omega) + \text{Im}_{o\bar{o}}^2(m, \omega)}. \quad (19)$$

Расширенная фазо-частотная характеристика (РФЧХ):

$$\varphi_{o\bar{o}}(m, \omega) = \arctg \frac{\text{Im}_{o\bar{o}}(m, \omega)}{\text{Re}_{o\bar{o}}(m, \omega)}. \quad (20)$$

Результаты расчётов приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Расширенные частотные характеристики объекта управления

$\omega, \text{с}^{-1}$	$\text{Re}_{o\bar{o}}(m, \omega)$	$\text{Im}_{o\bar{o}}(m, \omega)$	$A_{o\bar{o}}(m, \omega)$	$\varphi_{o\bar{o}}(m, \omega) \text{ м рад}$
0	70	0	70	0
0,002	71,011	-18,625	73,413	-0,257
0,004	64,563	-36,754	74,292	-0,518
0,006	52,156	-50,551	72,634	-0,77
0,008	37,161	-58,28	69,12	-1,003
0,01	22,622	-60,567	64,654	-1,213
0,012	10,159	-59,094	59,961	-1,401
0,014	0,184	-55,471	55,471	-1,567
0,016	-7,516	-50,83	51,383	1,424
0,018	-13,348	-45,848	47,751	1,287
0,02	-17,721	-40,89	44,565	1,162
0,022	-20,974	-36,134	41,78	1,045
0,024	-23,37	-31,657	39,348	0,935

Продолжение таблицы 8

0,026	-25,105	-27,478	37,22	0,83
0,028	-26,325	-23,592	35,35	0,731
0,03	-27,139	-19,982	33,702	0,635
0,032	-27,625	-16,626	32,242	0,542
0,034	-27,845	-13,501	30,945	0,451
0,036	-27,843	-10,588	29,788	0,363
0,038	-27,654	-7,867	28,751	0,277
0,04	-27,305	-5,324	27,819	0,193
0,042	-26,818	-2,944	26,979	0,109
0,044	-26,209	-0,716	26,219	0,027
0,046	-25,493	1,369	25,53	-0,054
0,048	-24,681	3,32	24,904	-0,134
0,05	-23,784	5,143	24,333	-0,213

Расчётные формулы корневого метода для ПИ - регулятора имеют вид:

$$\frac{K_p}{T_u} = - \frac{\omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \text{Im}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)}; \quad (21)$$

$$K_p = - \frac{m \cdot \text{Im}_{об}(m, \omega) + \text{Re}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)}, \quad (22)$$

где K_p – коэффициент передачи ПИ-регулятора;

T_u – постоянная интегрирования ПИ-регулятора.

Зададим диапазон изменения частоты $\omega = 0 \dots 0,046 \text{ с}^{-1}$ с шагом $\Delta\omega = 0,002 \text{ с}^{-1}$, определим параметры настройки регулятора $\frac{K_p}{T_u}$ и K_p в заданном диапазоне частот.

Результаты расчётов представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты расчёта параметров настройки ПИ - регулятора

$\omega, \text{с}^{-1}$	K_p/T_u	K_p
0	0	-0,014
0,002	0,00001	-0,012
0,004	0,00003	-0,00999
0,006	0,00006	-0,00743
0,008	0,0001	-0,00466
0,01	0,00015	-0,0017
0,012	0,00021	0,00138

Продолжение таблицы 9

0,014	0,00027	0,00456
0,016	0,00033	0,00778
0,018	0,00039	0,011
0,02	0,00044	0,014
0,022	0,00049	0,017
0,024	0,00053	0,02
0,026	0,00055	0,023
0,028	0,00056	0,0255
0,03	0,00057	0,028
0,032	0,00055	0,031
0,034	0,00051	0,0335
0,036	0,00046	0,035
0,038	0,00039	0,036
0,04	0,00029	0,037
0,042	0,00018	0,0375
0,044	0,00005	0,038
0,046	-0,0001	0,038

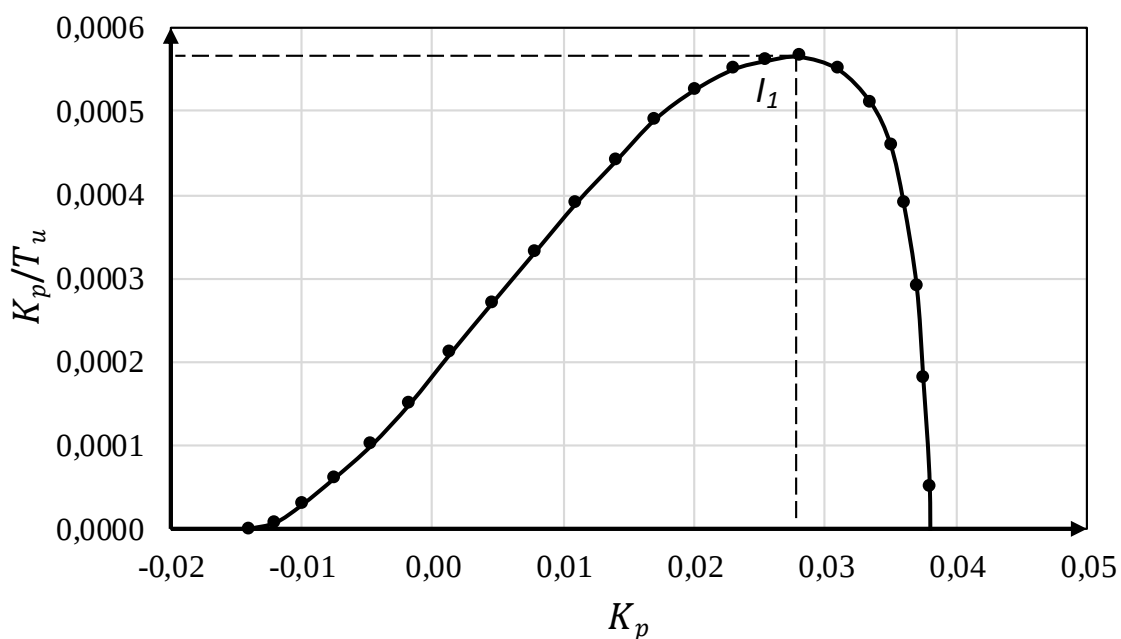


Рисунок 17 – Кривая заданного запаса устойчивости

Полученная кривая является границей заданной степени затухания $\psi = \psi_{\text{зад}} = 0,8$ процесса управления. Таким образом, все значения K_p/T_u и K_p , лежащие на этой кривой, обеспечивают заданную степень затухания.

4.3 Определение оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора

Поиск оптимальных параметров настройки регулятора осуществляется вдоль границы заданного запаса устойчивости системы регулирования, представленной на рисунке 17, до достижения экстремума принятого критерия качества.

В настоящей работе первая интегральная оценка используется как критерий качества. Минимальное значение данной оценки соответствует точке с максимальным значением соотношения K_p/T_u на линии заданного запаса устойчивости.

Из таблицы 9 определяем следующие значения: $\max(K_p/T_u) = 0,00057$, $K_p = 0,028$, $\omega = 0,03 \text{ с}^{-1}$.

Определяем значение постоянной интегрирования:

$$T_u = \frac{K_p}{(K_p / T_u)} = \frac{0,028}{0,00057} = 49,12 \text{ с.}$$

4.4 Расчет, построение и оценка качества переходного процесса в замкнутой АСУ по каналу задающего воздействия

Запишем передаточную функцию:

$$W_{s-y}(P) = \frac{W_{об}(P) \cdot W_p(P)}{1 + \frac{W_{об}(P) \cdot W_p(P)}{1 +}}, \quad (23)$$

где $W_{об}(P)$ – передаточная функция объекта;

$W_p(P)$ – передаточная функция регулятора.

Переходный процесс, идущий в замкнутой системе по каналу задающего воздействия, рассчитывается по методу трапеций. Чтобы рассчитать переходный процесс, необходимо определить вещественную частотную характеристику системы. Результаты расчета представлены в таблице 10.

Переходная характеристика системы связана с вещественной частотной характеристикой системы выражением:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{Re(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) d\omega, \quad (24)$$

где $Re(\omega)$ – вещественная частотная характеристика системы;

$\omega = 0,04$ – частота среза;

t – продолжительность переходного процесса.

Для достижения точности расчета в качестве верхнего предела интеграла применяется значение, при котором значение вещественной частотной характеристики стремится к 0.

Таблица 10 – Результаты расчета ВЧХ замкнутой системы

$\omega, \text{с}^{-1}$	$Re_{s,y}(\omega)$
0	1
0,005	1,031181
0,01	1,116414
0,015	1,222981
0,02	1,230741
0,025	0,643039
0,03	-1,19745
0,035	-1,91703
0,04	-1,42514
0,045	-0,95339
0,05	-0,636
0,055	-0,4236
0,06	-0,27612
0,065	-0,16992
0,07	-0,09115
0,075	-0,03142
0,08	0,014591
0,085	0,050365
0,09	0,078268
0,095	0,099945
0,1	0,116565

На рисунке 18 представлен график вещественной частотной характеристики системы. Определяем из графика значение частоты среза.

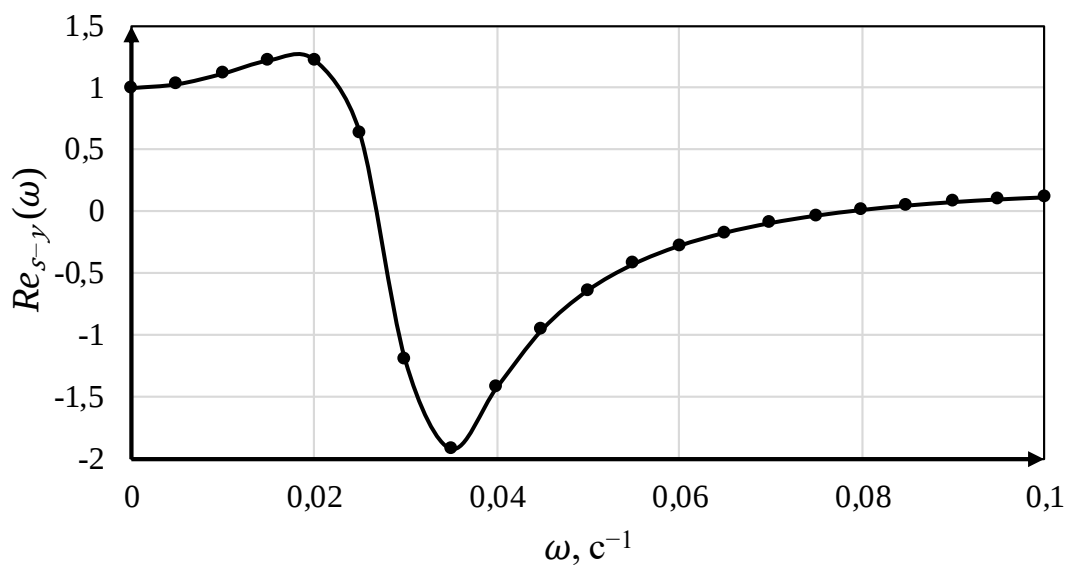


Рисунок 18 – Вещественная частотная характеристика системы

Конечный вид уравнения для определения переходного процесса системы имеет вид:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{0,035} \frac{\text{Re}_{s-y}(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) d\omega.$$

На рисунке 19 представлен переходный процесс замкнутой системы по каналу задающего воздействия.

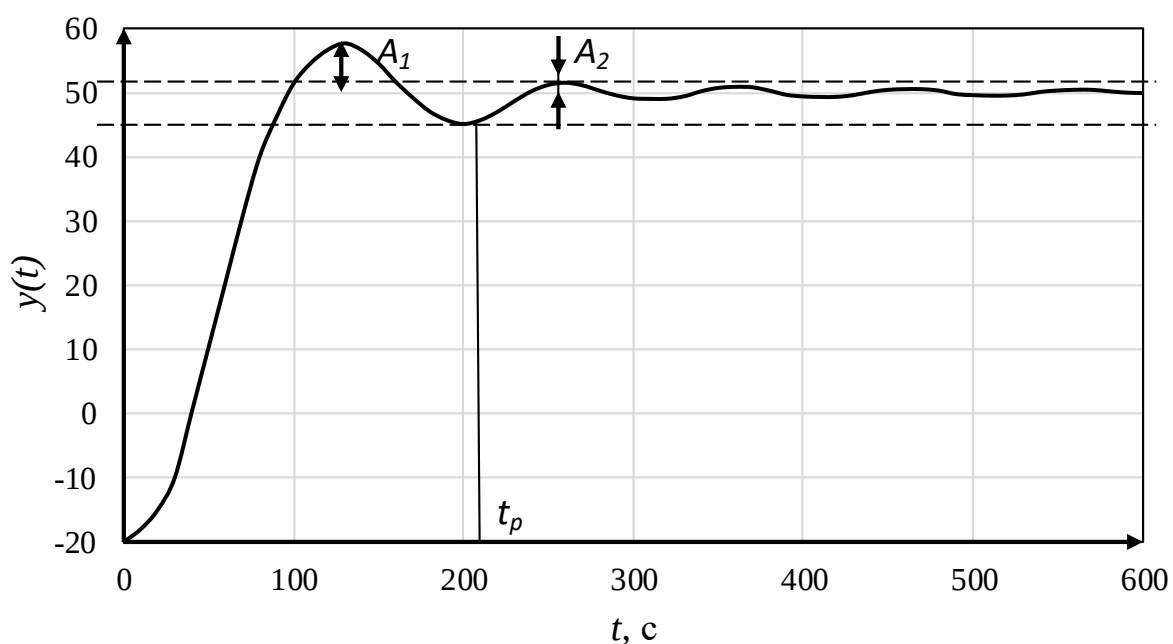


Рисунок 19 – Кривая разгона системы по каналу задающего воздействия

4.5 Оценка качества регулирования

Используя данные рисунка 19, произведём оценку качества переходного процесса в замкнутой АСУ.

Прямые критерии качества:

1. Максимальная динамическая ошибка:

$$A_1 = 7,658.$$

2. Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{A_1}{y(\infty)} \cdot 100 = \frac{7,658}{50} \cdot 100 = 15,32 \%,$$

где $A_1 = 7,658$ – первое отклонение регулируемой величины;

$y(\infty)$ – установившееся значение регулируемой величины при времени переходного процесса t ;

3. Степень затухания переходного процесса:

$$\psi = 1 - \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{1,324}{7,658} = 0,83,$$

где $A_2 = 1,324$ – второй максимальный выброс регулируемой величины;

4. Статическая ошибка:

$$\varepsilon = S - y(\infty) = 50 - 50 = 0,$$

где S – сигнал задающего воздействия;

5. Время регулирования:

$$t_p = 218 \text{ с.}$$

Сравнивая требуемую и полученную степени затухания, можно сделать вывод о том, что переходный процесс удовлетворяет требованиям к запасу устойчивости системы.

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

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ03	Семёновой Александре Евгеньевне

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ И.Н.Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта – не более 500 000 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 200 000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4,5 баллов из 5,0
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды (30,2%).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	1. Анализ и оценка конкурентоспособности; 2. FAST-анализ; 3. SWOT-анализ.
2. Разработка устава научно-технического проекта	1. Инициация проекта.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	1. Структур работ в рамках научного исследования; 2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; 3. Расчет бюджета научно-технического исследования (НТИ).
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	1. Определение интегрального финансового показателя разработки; 2. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3. Определение интегрального показателя эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	28.02.2022
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Семёнова Александра Евгеньевна		

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основная цель данного раздела заключается в экономическом планировании и оценке ресурсоэффективности разработки проекта автоматизированной системы управления подготовкой и подачей многокомпонентной жидкости в рабочую зону.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- определением потенциальных потребителей исследования;
- анализом конкурентных технических решений;
- выполнением SWOT-анализа проекта;
- оценкой готовности проекта к коммерциализации;
- рассмотрением методов коммерциализации результатов научно-технического исследования;
- рассмотрением и установкой целей и ожидаемых результатов проекта;
- планированием научно-исследовательской работы;
- расчётом бюджета научного исследования;
- определением ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Темой научно-исследовательской работы является разработка экспериментального стенда автоматизированной системы управления подготовкой и подачей многокомпонентной жидкости в рабочую зону. В частности, рассмотрен процесс приготовления и подачи в рабочую зону многокомпонентного жидкого топлива.

5.1 Потенциальные потребители результатов исследования

При написании магистерской диссертации были определены потенциальные потребители результатов исследования. К ним можно отнести энергетические компании, транспортный судоходный, железнодорожный и грузовой сектор, а также сельхозтехнику, дизельные генераторы и другие объекты, использующие традиционное топливо для выработки энергии. Для

анализа потребителей необходимо рассмотреть целевой рынок и провести сегментирование.

В зависимости от категории потребителей используются определенные критерии сегментирования. Критерии сегментации для коммерческих организаций можно разделить на несколько пунктов: месторасположение, отрасль, выпускаемая продукция, объем производства. В таблице 11 приведены эффекты от внедрения системы подготовки и подачи многокомпонентного жидкого топлива.

Таблица 11 – Карта сегментирования рынка по эффективности внедрения системы

Эффект от внедрения	Мощность установки		
	Большая	Средняя	Малая
Увеличение производительности	+	+	+
Сокращение затрат	+	+	-
Сокращение численности персонала	+	+	-
Снижение количества выбросов	+	+	+
Целесообразность внедрения	+	+	-

5.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Данный анализ проводится с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 12. Проводится сравнение разработанной технологии подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону (индекс «м») с использованием бензинового топлива (индекс «б») и дизельного топлива

(индекс «д») с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 12 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		М	Б	Д	М	Б	Д
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,1	5	1	3	0,5	0,1	0,3
2. Экологичность	0,2	5	2	3	1	0,4	0,6
3. Количество единиц оборудования	0,15	4	5	4	0,6	0,75	0,6
4. Безопасность	0,15	5	3	3	0,75	0,45	0,45
5. Удобство эксплуатации	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена топлива	0,12	2	5	4	0,24	0,6	0,48
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
3. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,08	5	2	3	0,4	0,16	0,24
Итого	1	37	25	29	4,49	3,16	3,57

Расчет конкурентоспособности определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (25)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единиц);

B_i – балл i -го показателя.

Конкурентоспособность научной разработки:

$$K = (0,1 \cdot 5) + (0,2 \cdot 5) + (0,15 \cdot 4) + (0,15 \cdot 5) + (0,1 \cdot 5) + (0,12 \cdot 2) + (0,1 \cdot 5) + (0,08 \cdot 5) = 4,49$$

На основании проанализированных данных сделан вывод о том, что многокомпонентное топливо является более конкурентоспособным по наиболее важным техническим критериям оценки. Данная разработка является наиболее актуальной, экологически чистой и безопасной.

5.3 FAST-анализ

FAST-анализ представляет собой метод, который базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат.

FAST-анализ включает в себя шесть стадий, а именно:

- выбор объекта FAST-анализа;
- описание функций объекта (главной, основной и вспомогательной);
- определение значимости выполняемых функций объектом;
- анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования;
- построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ;
- оптимизация функций, выполняемых объектом.

В качестве объекта FAST-анализа в данной работе выступает объект исследования – автоматическая система управления подготовкой и подачей многокомпонентной жидкости в рабочую зону. Анализ объекта с позиции его функциональности. Определены главные, основные и вспомогательные функции. Главная функция объекта представляет собой внешнюю функцию, определяющую назначение, сущность и главную цель создания объекта в целом. Основные и вспомогательные функции отражают внутренние функции объекта. Классификация функций, выполняемых объектом исследования представлена в таблице 13.

Таблица 13 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование	Выполняемые функции	Ранг функции		
		Главная	Основная	Вспомогательная
Автоматическая система	Обеспечивает повышение эффективности управления объектом исследования	+		
Программные средства	Позволяет выполнять комплекс программ или отдельных задач		+	
Аппаратные средства	Режим автоматического управления		+	
Персонал	Режим ручного управления		+	
SCADA-системы	Обеспечивает визуализацию технологического процесса			+
Организационные мероприятия	Направлены на успешное внедрение системы и безопасное ведение технологического процесса			+

Для оценки значимости функций воспользуемся методом расстановки приоритетов. В основе данного метода лежит расчетно-экспертное определение значимости каждой функции.

На первом этапе формируется матрица смежности функций (таблица 14). Функции определены согласно классификации функций (таблица 13) в порядке упоминания.

Таблица 14 – Матрица смежности функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6
Функция 1	=	>	>	>	>	>
Функция 2	<	=	=	=	>	>
Функция 3	<	=	=	=	>	>
Функция 4	<	=	=	=	>	>
Функция 5	<	<	<	<	=	>
Функция 6	<	<	<	<	<	=

Примечание: «<» – менее значимая; «=» – одинаковые функции по значимости;
«>» – более значимая

На втором этапе матрица смежности преобразуется в матрицу количественных соотношений функций (таблица 15).

Таблица 15 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	ИТОГО
Функция 1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	8,5
Функция 2	0,5	1	1	1	1,5	1,5	6,5
Функция 3	0,5	1	1	1	1,5	1,5	6,5
Функция 4	0,5	1	1	1	1,5	1,5	6,5
Функция 5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1,5	4,5
Функция 6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	3,5
Примечание: 0,5 при «<»; 1,5 при «>»; 1 при «=»							36

В рамках третьего этапа определена значимость функций путем деления балла, полученного по каждой функции на общую сумму баллов по всем функциям. Таким образом, для функции 1 относительная значимость равна $8,5/36 = 0,24$; для функции 2 – $6,5/36 = 0,18$; для функции 3 – $6,5/36 = 0,18$; для функции 4 – $6,5/36 = 0,18$; для функции 5 – $4,5/36 = 0,13$; для функции 6 – $3,5/36 = 0,09$.

С использованием нормативного метода определен уровень затрат на выполнение каждой функции. Расчет стоимости функций приведен в таблице 16.

Таблица 16 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование функции	Стоимость оборудования, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Автоматическая система	200 000	200 000	400 000
Программные средства	100 000	0	100 000

Продолжение таблицы 16

Аппаратные средства	150 000	0	150 000
Персонал	0	300 000	300 000
SCADA-системы	50 000	30 000	80 000
Организационные мероприятия	20 000	30 000	50 000

Информация об объекте исследования, собранная в рамках предыдущих стадий, на данном этапе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (ФСД) (рисунок 20).

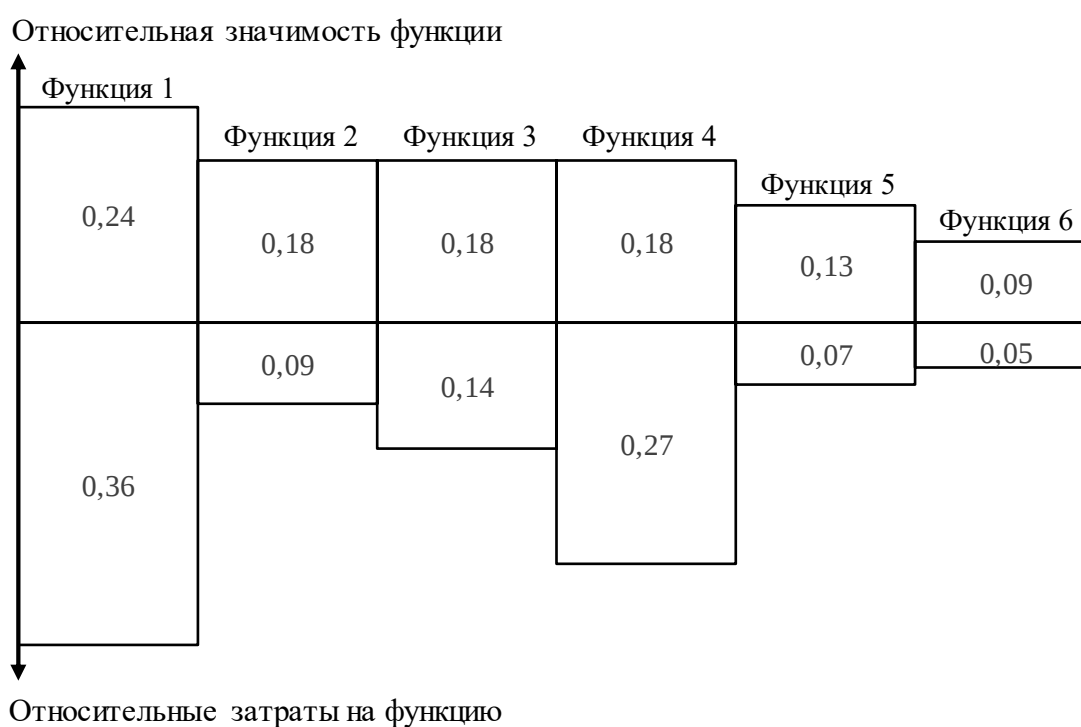


Рисунок 20 – Функциональная стоимостная диаграмма

Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью (полезностью) функций и затратами на них. Анализ приведенной на рисунке 20 ФСД показывает наличие рассогласования по функциям 1, 4. Отсюда следует необходимость ликвидировать данные диспропорции.

В качестве конкретных шагов по снижению диспропорции между относительной значимостью и относительными затратами на функции 1 и 4 предлагается предпринять следующее: оптимизировать технические параметры и параметры надежности системы; применять современные методы разработки автоматических систем, а также улучшить взаимодействие персонала и оборудования для получения более ресурсоэффективного и высокотехнологичного результата.

5.4 SWOT-анализ

Для того, чтобы изучить внешнюю и внутреннюю среду проекта, проведен SWOT-анализ с подробной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз (таблица 17). На основании анализа делаются выводы: правильно ли развивается проект, какие риски нужно предусмотреть, что следует делать, каковы перспективы проекта.

Таблица 17 – SWOT-анализ

	Сильные стороны: С1. Экологичность; С2. Низкая стоимость производства; С3. Возможность варьирования состава; С4. Надежность.	Слабые стороны: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой; Сл2. Проект не опробован в режиме производства.
Возможности: В1. Снижение цены на топливо; В2. Возможность долговременной эксплуатации технологии; В3. Обновление методик, работающих в данной области;	1. Снижение цены многокомпонентного топлива за счет варьирования состава и концентрации компонентов; 2. Увеличение срока эксплуатации за счет надежности и простоты системы. 3. Поиск новых решений по улучшению экологической ситуации.	1. Подбор компонентов и их процентного содержания является сложной задачей. Необходимо проводить различные тестирования образцов, чтобы убедиться в их пригодности в качестве топлива.

Продолжение таблицы 17

Угрозы: У1. Неблагоприятные изменения курсов валют или торговой политики в других странах; У2. Износ двигателя за счет воды; У3. Конкуренция в сфере новых топливных технологий. У4. Непригодность предприятий для реализации технологии.	1. Рост цен на компоненты топлива; 2. Появление аналогичного топлива с лучшими характеристиками; 3. Медленная реализация проекта.	1. Есть вероятность того, что вода, способствующая улучшению экологических свойств топлива, может негативно влиять на составные части двигателя. Необходимо проводить реальные эксперименты, чтобы определить это. В случае подтверждения данного опасения нужно варьировать состав топлива.
--	---	--

В результате SWOT-анализа рассмотрены сильные и слабые стороны научно-технического проекта. На их основе выявлены возможности улучшения проекта, такие как снижение цены многокомпонентного топлива и увеличение срока эксплуатации разработки.

Помимо этого, анализ помог выявить пункты, на которые следует обратить внимание, а именно на отсутствие реальных объектов, полностью реализующих эту технологию. За счет данного недостатка проект не является быстрореализуемым. В рамках темы исследования рассмотрены лишь основополагающие аспекты, которые позволяют оценить возможность реализации проекта.

Также выявлена угроза развития проекта – появление аналога топлива с лучшими характеристиками. Основными направлениями развития проекта стоит считать варьирование компонентного состава для того, чтобы увеличить эффективность использования предлагаемого топлива.

5.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Для оценки степени готовности научной разработки к коммерциализации и выяснения уровня собственных знаний для ее проведения заполняется специальная форма (таблица 18), содержащая

показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

Таблица 18 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	4
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	4	3
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	55	52

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (26)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Таким образом, моно сделать вывод о том, что перспективность коммерциализации научного проекта выше среднего. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта, которая включает в себя анализ рынков сбыта, разработку бизнес-плана и стратегий коммерциализации.

5.6 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок:

- торговля патентными лицензиями, т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе;
- передача ноу-хау, т.е. предоставление владельцем ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществляемое путем раскрытия ноу-хау;
- инжиниринг предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг;
- франчайзинг, т.е. передача или переуступка разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.
- организация собственного предприятия;

- передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия;
- организация совместного предприятия, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия;
- организация совместных предприятий, работающих по схеме «российское производство –зарубежное распространение».

Таким образом, для данного научно-технического исследования наиболее предпочтительным является такой метод коммерциализации как инжиниринг. Благодаря этому методу можно использовать разработку в качестве технического решения для снижения затрат при генерации энергии связанных с топливным сегментом, а также уменьшить количество антропогенных выбросов.

5.7 Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

В данном разделе приводится информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представим в таблице 19.

Таблица 19 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Заказчик проекта	Достижение желаемого результата, выполнение поставленных задач
Спонсор	Успешная реализация поставленных задач, публикации в известных журналах
Руководитель проекта	Выполнение всех обязательств, успешная реализация проекта
Команда проекта	Получение опыта работы

В таблице 20 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях их достижения.

Таблица 20 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Разработка технологии приготовления жидкого многокомпонентного топлива и исследование процесса взаимодействия его капель с нагретой поверхностью.
Ожидаемые результаты проекта:	Получение ожидаемых результатов при исследовании взаимодействия многокомпонентного топлива с нагретой поверхностью: высокий КПД ДВС, при сжигании многокомпонентного топлива выделяемая тепловая энергия должна быть на уровне, соответствующем сжиганию традиционного топлива, при меньшем уровне антропогенных выбросов.
Критерии приемки результата проекта:	Уровень антропогенных выбросов; Характеристики вторичного измельчения и горения топливной смеси
Требования к результату проекта:	Низкая стоимость топлива
	Возможность вовлечения накопившихся отходов в топливный цикл
	Низкий уровень антропогенных выбросов

Определяются участники рабочей группы научного проекта, роль каждого участника в данном проекте, а также прописываются функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте (таблица 21).

Таблица 21 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, дней
1	Семёнова А.Е., ТПУ, магистр	Исполнитель проекта	Проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных результатов, разработка конструкторской документации	101
2	Пискунов М.В., ТПУ, доцент	Руководитель проекта	Планирование работ, анализ полученных результатов, координация и проверка деятельности исполнителя	48
3	ТПУ	Заказчик проекта	Финансовая поддержка	
ИТОГО:				149

Все факторы, которые могут служить ограничением степени свободы членов команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках этого проекта, называются ограничениями проекта (таблица 22).

Таблица 22 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
Бюджет проекта	500 000 руб.
Источник финансирования	ТПУ
Сроки проекта	01.02.22 - 01.05.22
Дата утверждения плана управления проектом	01.02.22
Дата завершения проекта	01.05.22
Прочие ограничения и допущения	Ограничение времени использования научного оборудования

5.8 Планирование управления научно-техническим проектом

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и инженер (И). После чего в рамках

проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в таблице 23.

Таблица 23 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Исполнитель
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания (схем моделирования, проектирования)	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме, примерный план работ	Научный руководитель
	3	Выбор направления оптимизационной задачи	Инженер
	4	Календарное планирование работ	Научный руководитель
Теоретические исследования	5	Разработка вариантов проектирования	Инженер
	6	Сравнение возможных вариантов по ряду критериев	Инженер
	7	Расчет основных и аварийных принципов функционирования	Инженер
Экспериментальные исследования	8	Проведение экспериментальных исследований	Научный руководитель + Инженер
	9	Обработка полученных данных	
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель
Разработка технической документации	11	Выбор технических средств автоматизации	Инженер
	12	Разработка схемной документации	Инженер
Оформление отчёта по НИР	13	Составление пояснительной записки по проекту	Инженер

В рамках планирования научного проекта необходимо составить календарный график проекта. Линейный график проекта приведен в таблице 24. Диаграмма Ганта – тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (таблица 25).

Таблица 24 – Линейный график проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1.	Составление и утверждение технического задания (схем моделирования, проектирования)	3	1.02.22	3.02.22	Пискунов М.В.
2.	Подбор и изучение материалов по теме, примерный план работ	4	4.02.22	7.02.22	Пискунов М.В.
3.	Выбор направления оптимизационной задачи	6	8.02.22	13.02.22	Семёнова А.Е.
4.	Календарное планирование работ	1	14.02.22	14.02.22	Пискунов М.В.
5.	Разработка вариантов проектирования	9	15.02.22	23.02.22	Семёнова А.Е.
6.	Сравнение возможных вариантов по ряду критериев	3	24.02.22	26.02.22	Семёнова А.Е.
7.	Расчет основных и аварийных принципов функционирования	10	27.02.22	8.03.22	Семёнова А.Е.
1.	Проведение экспериментальных исследований	16	9.03.22	24.03.22	Пискунов М.В. + Семёнова А.Е.
2.	Обработка полученных данных	15	25.03.22	8.04.22	Пискунов М.В. + Семёнова А.Е.
3.	Оценка эффективности полученных результатов	9	9.04.22	17.04.22	Пискунов М.В.
4.	Выбор технических средств автоматизации	7	18.04.22	24.04.22	Семёнова А.Е.
5.	Разработка схемной документации	25	25.04.22	19.05.22	Семёнова А.Е.
6.	Составление пояснительной записки по проекту	10	20.05.22	29.05.22	Семёнова А.Е.
Итого:	118				

Таблица 25 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код	Вид работы	Исполнители	Тк, кал. Дн.	Продолжительность выполнения работ											
				февр.			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.	Составление и утверждение технического задания (схем моделирования, проектирования)	Пискунов М.В.	3												
2.	Подбор и изучение материалов по теме, примерный план работ	Пискунов М.В.	4												
3.	Выбор направления оптимизационной задачи	Семёнова А.Е.	6												
4.	Календарное планирование работ	Пискунов М.В.	1												
5.	Разработка вариантов проектирования	Семёнова А.Е.	9												
6.	Сравнение возможных вариантов по ряду критериев	Семёнова А.Е.	3												
7.	Расчет основных и аварийных принципов функционирования	Семёнова А.Е.	10												
8.	Проведение экспериментальных исследований	Пискунов М.В. + Семёнова А.Е.	16												
9.	Обработка полученных данных	Пискунов М.В. + Семёнова А.Е.	15												
10.	Оценка эффективности полученных результатов	Пискунов М.В.	9												
11.	Выбор технических средств автоматизации	Семёнова А.Е.	7												
12.	Разработка схемной документации	Семёнова А.Е.	25												
13.	Составление пояснительной записки по проекту	Семёнова А.Е.	10												



– руководитель



– инженер

Таким образом, построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены дата начала и окончания работ и состав участников.

5.10 Бюджет научного исследования

При планировании научно-технического проекта необходимо обеспечить полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его реализацией. При формировании бюджета научно-технического проекта используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- затраты на оборудование;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

Материальные затраты включают в себя расходы на канцелярские принадлежности. В материальные затраты включаются также транспортно-заготовительные расходы (ТЗР) в пределах от 5% до 20% от общей цены материалов. Расчет материальных затрат приведен в таблице 26.

Таблица 26 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Цена за ед., руб.	Кол-во, шт.	Сумма, руб.
Офисная бумага, упак., 500 л.	310	1	310
Тетрадь общая, 48 л.	45	1	45
Шариковая ручка	30	2	60
Картридж для принтера	1550	1	1 550
Итого:			1 965
Итого с учетом ТЗР (5%)			2 063,25

По данным таблицы 26 видно, что материальные затраты с учетом транспортно-заготовительных расходов (ТЗР) составили 2 063,25 руб.

В таблице 27 приведен бюджет затрат на оборудование, использованное при проведении научно-технического исследования.

Таблица 27 – Бюджет затрат на оборудование разрабатываемой АСУ

Наименование оборудования	Количество, шт.	Цена за ед., руб.	Итоговая сумма, руб.
Персональный компьютер	1	44 000	44 000

Наибольшие затраты при разработке АСУ приходятся на приобретение самого объекта автоматизации.

Рассчитывается основная заработная плата работников, участвующих в выполнении научно-технического проекта. Оклад научного руководителя составляет 27 600 руб., оклад инженера 12 700 руб.

Затраты на заработную плату:

$$C_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (27)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ рассчитывается по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \cdot (1 + K_{пр} + K_{д}) \cdot K_p, \quad (28)$$

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.;

$K_{пр}$ – премиальный коэффициент (0,3);

$K_{д}$ – коэффициент доплат и надбавок (0,2-0,5);

K_p – районный коэффициент (для Томска 1,3);

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}. \quad (29)$$

Z_m – оклад работника за месяц, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени персонала, раб. дн.

Таблица 28 – Баланс рабочего времени (для 6-дневной недели)

Показатели рабочего времени	Дни
Календарные дни	366
Нерабочие дни (праздники/выходные)	118
Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезни)	10
Действительный годовой фонд рабочего времени	238

Рассчитывается среднедневная заработная плата для инженера и вносится в таблицу 29:

$$Z_{\text{дн инж}} = \frac{12700 \cdot 11,2}{238} = 597,7 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{дн рук}} = \frac{27600 \cdot 11,2}{238} = 1298,8 \text{ руб.}$$

Таблица 29 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$K_{\text{пр}}$	K_o	K_p	T_p	$Z_{\text{осн}}$
Инженер	597,7	0,05	0,05	1,3	101	86 318,6
Руководитель	1 298,8	0,05	0,05	1,3	48	89 151,0
Итого						175 468,6

Рассчитывается дополнительная заработная плата для исполнителей научно-технического проекта:

$$Z_{\text{доп}} = 0,12 \cdot Z_{\text{осн}}. \quad (30)$$

$$Z_{\text{доп инж}} = 0,12 \cdot 86318,6 = 10358,2 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{доп рук}} = 0,12 \cdot 89151,0 = 10698,1 \text{ руб.}$$

Отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = 0,3 \cdot (З_{осн} + З_{доп}); \quad (31)$$

Рассчитаем величину внебюджетных отчислений:

$$З_{внеб \text{ инж}} = 0,3 \cdot (86318,6 + 10358,2) = 29003,0 \text{ руб.};$$

$$З_{внеб \text{ рук}} = 0,3 \cdot (89151,0 + 106398,1) = 29954,7 \text{ руб.};$$

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы и т.д. Величина коэффициента накладных расходов принимается в размере 16%. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = 0,16 \cdot (З_{мат} + З_{обор} + З_{осн} + З_{доп} + З_{внеб}). \quad (32)$$

Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 30.

Таблица 30 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование	Сумма, руб.
Материальные затраты	2 063,25
Затраты на оборудование	44 000
Затраты на основную заработную плату	175 468,6
Затраты на дополнительную заработную плату	21 056,3
Отчисления во внебюджетные фонды	58 957,7
Накладные расходы	48 263,1
Общий бюджет	349 808,95

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

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин.

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (33)$$

где Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный параметр ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (34)$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 32. Под текущим проектом понимается разрабатываемая автоматизированная система подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону с возможностью варьирования состава топлива, регистрации изменяющихся технических параметров в режиме реального времени и работы как в ручном, так и в автоматическом режиме. Аналогом являются существующие системы подачи жидкости в рабочую зону на основе традиционного топлива, в частности, бензина.

$$I_{pi\ mn} = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,1 = 4,6;$$

$$I_{pi\ аналог} = 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 = 3,8.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки $I_{исп.i}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}}; \quad (35)$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}; \quad (36)$$

Таблица 31 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
Критерий			
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,10	5	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиями потребителей)	0,15	5	4
3. Энергосбережение	0,20	4	4
4. Надежность	0,25	5	4
5. Материалоемкость	0,10	5	3
Итого:	1	28	22

Таблица 32 – Сравнительная эффективность проекта

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
1.	Интегральный финансовый показатель	1	1
2.	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	3,8
3.	Интегральный показатель эффективности	4,8	3,8
4.	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,00	0,6

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 предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности

Выводы по разделу Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В рамках данного раздела были решены следующие задачи: составлен перечень работ и произведена оценка времени их выполнения; составлена

смета затрат на проект; составлена смета затрат на оборудование и монтажные работы для реализации проекта; определена ресурсоэффективность проекта.

Выполнена оценка конкурентных технических решений. В результате оценки выявлено, что использование многокомпонентного топлива является более перспективным вариантом, чем использование традиционных видов топлива в энергетической промышленности.

Проведен FAST-анализ проекта, в результате которого выявлены значимые функции проекта, а также проведена оценка затрат на реализацию каждой функции.

Выявлены сильные и слабые стороны научно-исследовательского проекта, а также его возможности и вероятные угрозы при помощи SWOT-анализа. Определены наиболее эффективные стратегии развития и коммерциализации проекта. Для реализации проекта наиболее благоприятными направлениями являются: возможность долговременной эксплуатации технологии и обновление методик, работающих в данной области. Главными угрозами для реализации проекта являются: неблагоприятные изменения курсов валют или торговой политики в других странах и конкуренция в сфере топливных технологий. Оптимальным методом коммерциализации проекта является инжиниринг. Благодаря этому методу можно будет использовать разработку в качестве технического решения для снижения затрат при генерации энергии, связанных с топливным сегментом, а также уменьшить количество антропогенных выбросов.

Интегральный критерий ресурсоэффективности имеет высокий показатель (4,8 из 5), что говорит об эффективности использования проекта. Исследования выполнялись исполнителями: научным руководителем (48 дней) и инженером (101 день). На исследование потрачено 349 808,95 рублей. На основе всех результатов НТИ можно считать успешным.

Внедрение системы подготовки и подачи жидкого многокомпонентного топлива позволит минимизировать расходы топлива, повысить динамику процесса горения и поспособствует снижению антропогенных выбросов.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ03	Семёновой Александре Евгеньевне

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

АСУ ТП подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Введение:

- Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.
- Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации.

Объектом исследования является автоматизированная система подготовки подачи многокомпонентного жидкого топлива. Область применения: энергетическая отрасль.
Рабочая зона: производственное помещение.
Размеры помещения: площадь не менее 150 м².

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения/при эксплуатации:

- Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;
- Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

- Трудовой Кодекс Российской Федерации» от 30.12. 2001 № 197-ФЗ.
- ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя.
- ГОСТ 21958-76 Система «Человек-машина».
- ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ Средства защиты работающих.

2. Производственная безопасность при разработке проектного решения/при эксплуатации:

- Анализ выявленных вредных и опасных факторов;
- Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора.

Вредные факторы:
– повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны;
– повышенный уровень шума;
– электромагнитное излучение;
– воздействие химических веществ.
Опасные факторы:
– движущиеся машины и механизмы, подвижные части производственного оборудования;
– поражение электрическим током;
– тепловое воздействие.

3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения/при эксплуатации:

Гидросфера: утечка жидких компонентов топлива и нефтепродуктов в близлежащие водоемы.
Литосфера: загрязнение почвы нефтепродуктами и хим. веществами.

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения/при эксплуатации:	Возможные ЧС: возникновение пожара, возгорание компонентов топлива, взрывы. Наиболее типичная ЧС – возникновение пожара.
---	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	28.02.2022
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД	Сечин Александр Иванович	Д.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Семёнова Александра Евгеньевна		

6 Социальная ответственность

Введение

К вопросам социальной ответственности в данной работе относятся: правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности; производственная безопасность; экологическая безопасность; безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Охраной труда называют систему сохранения здоровья и жизни работников в процессе трудовой деятельности, включающую в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия. Главной задачей охраны труда является создание условий для безопасной трудовой деятельности человека, которые подразумевают исключение или минимизацию воздействия вредных факторов в процессе трудовой деятельности.

В данной работе спроектирована система подготовки и подачи многокомпонентного жидкого топлива. Предполагается использование системы на уже существующих объектах энергетической промышленности. Для обеспечения работоспособности системы необходим оператор, который будет отслеживать состояние контролируемых параметров. Также необходима бригада для обслуживания системы. Помещение, в котором будет находиться оператор, состоит из двух рабочих мест. Общая площадь помещения составляет не менее 150 квадратных метров. При выполнении работ на оператора могут воздействовать следующие вредные факторы: повышенная температура воздуха рабочей зоны; повышенная влажность; недостаточная освещенность рабочего места; повышенный уровень шума; электромагнитное излучение.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

6.1.1 Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства

В основе правового законодательства Российской Федерации лежит Конституция РФ. Согласно основному закону, законы и правовые акты, принимаемые в РФ, не должны противоречить Конституции. Трудовой кодекс РФ [51] устанавливает права и обязанности работодателей и работников в отношении охраны труда. Принятые нормы в области охраны труда гласят: 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. Действующим нормативным документом по охране труда является ГОСТ 12.0.004-2015 [52]. Спецодежда, спецобувь и другие средства защиты должны соответствовать действующему стандарту ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ [53].

6.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Основным объектом является рабочее место, представляющее собой в общем случае пространство, в котором может находиться человек при выполнении рабочих задач.

Согласно Трудовому кодексу РФ [51] каждый работник имеет право на рабочее место, защищенное от воздействия вредных или опасных производственных факторов; на возмещение вреда, причиненного увечьем, профессиональным заболеванием или иным повреждением здоровья, связанным с исполнением им трудовых обязанностей; на обучение безопасным методам и приемам труда за счет работодателя и т.д.

Рабочее место оператора и обслуживающего персонала должно соответствовать нормативному документу ГОСТ 12.2.032-78 [54], а расположение рабочего места согласно ГОСТ 21958-76 [55].

Согласно приведенным выше нормативным документам, при компоновке рабочего места необходимо учитывать: проход вокруг рабочего стола должен составлять не менее 500-550 мм; расположение экрана монитора должно быть от глаз пользователя на расстоянии примерно равным 600-700 мм, но не ближе чем 500 м; 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).

6.2 Производственная безопасность

6.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в виде таблицы 33. Для выбора факторов использовался ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

Таблица 33 – Опасные и вредные факторы

Факторы (12.0.003-2015)	Этапы работы		Нормативные документы
	Рабочее место в операторской	Производственное помещение	
1. Отклонение параметров микроклимата	+		Микроклимат – СанПиН 2.2.4.548 – 96 [56]
2. Повышенный уровень шума		+	Освещение – СП 52.13330.2011 [57] Шумы – СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [58]

Продолжение таблицы 33

3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+		Электромагнитное излучение - СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [59]
4. Повышенный уровень электромагнитных излучений	+		Электробезопасность – ГОСТ 12.1.038-82 [60] Естественное и искусственное освещение – СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 [61]
5. Поражение электрическим током	+	+	Защита от тепловых воздействий ГОСТ Р 30331.4-95 [62]
6. Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов	+	+	

Проведение экспериментальных исследований подразумевало работу с легковоспламеняющимися веществами, в частности с дизельным топливом. Марки дизельного топлива классифицируют в соответствии с ГОСТ 305-82.

Дизельное топливо, как типичный нефтепродукт, при длительном и частом воздействии на кожный покров может привести к кожным заболеваниям. Попадая через кожный покров в организм человека, дизельное топливо способно вызвать отравление. Пары нефтепродуктов также оказывают на человека раздражающее и наркотическое действие. При больших концентрациях паров возможны потери сознания, а также нарушения сердечной деятельности.

Пары дизельного топлива способны вспыхивать при температуре 57 °С под действием источника зажигания, поэтому при проведении экспериментальных исследований в обязательном порядке следует соблюдать правила пожарной безопасности.

Отклонение параметров микроклимата

Работник, находясь на месте в производственном помещении подвержен влиянию микроклимату рабочих помещений. Микроклимат характеризуется такими параметрами, как температура, скорость потока, влажность воздуха и температура окружающих поверхностей. Отклонения этих параметров могут

возникать за счет неисправной работы отопительной системы, перегрева приборов, оконных щелей и т.д.

Работа на ПК в офисном помещении относится к классу легких работ. Для данного типа работ допустимые величины микроклимата должны обеспечиваться при следующих условиях:

Перепад температуры воздуха должен быть не более 3...3,5 °С;

Перепад температуры воздуха по горизонтали, а также ее изменения в течение смены не должны превышать 3,5...4 °С;

Оптимальные параметры микроклимата приведены в таблице 34 согласно СанПиН 2.2.4.548-96. В таблице 35 приведены допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах.

Таблица 34 – Оптимальные параметры микроклимата на рабочем месте

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

Таблица 35 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		Ниже оптимальных величин	Выше оптимальных величин		ниже оптимальных величин, не более	выше оптимальных величин, не более**
Холодный	Iб (140 ... 174)	19,0 ... 20,9	23,1 ... 24,0	15...75	0,1	0,2
Теплый	Iб (140 ... 174)	20,0 ... 21,9	24,1 ... 28,0	15...75*	0,1	0,3

* При температурах воздуха 25° С и выше максимальные величины относительной влажности воздуха должны приниматься в соответствии со специальными требованиями.

** При температурах воздуха 26...28° С скорость движения воздуха в теплый период года должна приниматься в соответствии со специальными требованиями.

Для поддержания соответствующих микроклиматических параметров на рабочем месте используются системы вентиляции и отопления.

Вредным веществом, содержащимся в воздухе, является углекислый газ CO₂, который возникает от жизнедеятельности людей на рабочих местах. Большое содержание углекислого газа в закрытом помещении вызывает у человека слабость, сонливость, головные боли, снижает умственную и физическую активность. ПДК CO₂ в воздухе согласно ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» составляют 20 мг/м³.

Повышенный уровень шума

Шумом принято считать различные нежелательные для человека звуки. Шум в производственном помещении возникает от работы вентилятора, большого расхода горячего воздуха во время процесса сушки, работы самой сушильной камеры. Так же, как и микроклимат, шум влияет на самочувствие человека.

Одним из методов уменьшения воздействия шума в лаборатории является снижение или ослабление шума в его источниках – генераторы, нагреватели, трансформаторы, вентиляторы, специализированные механизмы и устройства. Своевременное устранение этих причин позволяет снизить уровень шума.

В таблице 36 приведены допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука, которые регламентируются СН 2.2.4/2.1.8.562-96.

Таблица 36 – 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	8000	
ОРУ	99	92	86	83	80	78	76	74	85

Недостаточная освещенность рабочей зоны

Освещение рабочего места – неотъемлемый элемент, влияющий на благоприятные условия труда работника. Длительное пребывание в условиях недостаточного освещения в рабочей зоне способствует развитию близорукости, затрудняет продолжительную работу и вызывает утомление. Излишне яркий свет снижает зрительные функции, приводит к перевозбуждению нервной системы, уменьшает работоспособность.

Работа за ПК относится к зрительным работам высокой точности для любого типа помещений согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Нормирование освещенности для работы за ПК приведено в таблицах 37, 38. Требования к освещению на рабочих местах, в работе которых используются ПК, представлены в таблице 39 согласно СП 52.13330.2011.

Таблица 37 – Нормирование освещенности для работы с ПК

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Относительная продолжительность зрительной работы при направлении зрения на рабочую поверхность, %
Высокой точности	От 0,3 до 0,5	Б	1	Не менее 70
			2	Менее 70

Таблица 38 – Нормирование освещенности для работы с ПК

Характеристика зрительной работы	Искусственное освещение				Естественное освещение	
	Освещенность на рабочей поверхности от системы общего освещения, лк	Цилиндрическая освещенность, лк	Объединенный показатель UGR, не более	Коэффициент пульсации освещенности КП, %, не более	КЕО еН, %, при	
					Верхнем или комбинированном	Боковом
Высокой точности	300	100*	21 18**	15	3,0	1,0
	200	75*	24 18**	20 15***	2,5	0,7

Таблица 39 – Требования к освещению на рабочих местах с ПК

Освещенность на рабочем столе	300–500 лк
Освещенность на экране ПК	не выше 300 лк
Блики на экране	не выше 40 кд/м ²
Прямая блескость источника света	200 кд/м ²
Показатель ослепленности	не более 20
Показатель дискомфорта	не более 15
Отношение яркости:	
– между рабочими поверхностями	3:1–5:1
– между поверхностями стены оборудования	10:1
Коэффициент пульсации:	не более 5%

Повышенный уровень электромагнитных излучений

Так как трудовая деятельность оператора АСУ ТП, в частности, связана с работой за персональным компьютером, то на него оказывается воздействие электромагнитного излучения. Источниками электромагнитного излучения являются все элементы персонального компьютера. Электромагнитные излучения негативно влияют на нервную, эндокринную и сердечно-сосудистую системы.

Требования к уровням электромагнитных полей на рабочих местах, оборудованных ПВМ, представлены в таблице 40, согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

Таблица 40 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 Гц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Электробезопасность

Источниками поражения электрическим током человека являются ПЭВМ, периферийные устройства, а также само оборудование, токоведущие

элементы и элементы, находящиеся под напряжением. Последствиями поражения являются ожоги на теле, судороги, потеря сознания и даже смерть человека.

Помещение, в котором находится рабочее место, можно отнести к классу без повышенной опасности, которая соответствует условиям согласно с ГОСТ 12.1.038-82: напряжение питающей сети 220 В, 50 Гц; относительная влажность воздуха 50%; температура около 24°C; наличие полового покрытия, непроводящего ток.

Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов

Процесс сушки характеризуется использованием горячего воздуха температурой 120 °С вследствие чего нагревается сама сушильная камера и части оборудования, по которым передвигается горячий воздух. Последствиями контакта с высоко нагретыми поверхностями являются ожоги.

6.2.2 Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора

Производственное оборудование и аппаратура, работающая под давлением, зачастую, не является полностью герметичной. Герметичность оборудования уменьшается по мере ее эксплуатации. Будем считать, что просачивание газов и паров через неплотности и зазоры подчиняется тем же законам, что и истечения через небольшие отверстия, и, предположим, что истечение происходит адиабатически, тогда количество газов и паров, просачивающихся через неплотные соединения, можно рассчитать по выражению:

$$G = kcv\sqrt{\frac{M}{T}}, \text{ кг / ч}, \quad (37)$$

где k – коэффициент, учитывающий повышение утечки от износа оборудования ($k=1-2$);

c – коэффициент, учитывающий влияние давления газа в аппарате;

v – внутренний объем аппаратуры и трубопроводов, находящихся под давлением, м³;

M – молекулярный вес газов, находящихся в аппаратуре;

T – абсолютная температура газов в аппаратуре, К.

Потребный воздухообмен вычисляется по выражению:

$$L = \frac{1000G}{x_n - x_e}, \text{ м}^3 / \text{ч}, \quad (38)$$

где x_e – предельно допустимая концентрация вредности в воздухе рабочей зоны помещения согласно ГОСТ 12.1.005-88, мг/м³;

x_n – максимально возможная концентрация той же вредности в воздухе населенных мест (ГН 2.1.6.1338-03), мг/м³.

В таблице 41 приведены значения коэффициента c для различных давлений газа в оборудовании.

Таблица 41 – Значения коэффициента, учитывающего влияние давления газа в аппарате

Давление p , атм	До 2	2	7	17	41	161
c	0,121	0,166	0,182	0,189	0,25	0,29

В системе приготовления топлива рабочее давление в аппаратуре 1 атм, а в проводящих трубопроводах 2 атм. Внутренний объем аппаратуры составляет 100 м³, трубопроводов 12 м³. Температура газов в аппаратуре 30 °С, в трубопроводе 40 °С.

Определим величины утечек газа из аппаратуры и трубопроводов. Принимаем $k=1,5$; $c=0,166$ (по таблице 6.9); $M=142,2817$ для $C_{10}H_{22}$; Утечка газа из аппаратуры составляет:

$$G_a = 1,5 \cdot 0,121 \cdot 100 \cdot \sqrt{\frac{142,2817}{303,15}} = 12,434 \text{ кг / ч.}$$

Утечка газа из трубопровода составляет:

$$G_{mp} = 1,5 \cdot 0,166 \cdot 12 \cdot \sqrt{\frac{142,2817}{313,15}} = 2,014 \text{ кг / ч.}$$

Величина утечки газа из аппаратуры и трубопровода:

$$G = G_a + G_{mp} = 12,434 + 2,014 = 14,448 \text{ кг / ч.}$$

Используя данные из таблиц, находим, что для декана $x_g=100 \text{ мг/м}^3$; $x_n=5 \text{ мг/м}^3$. Потребный воздухообмен равен:

$$L = \frac{1000 \cdot 14,448}{100 - 5} = 152,084 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

6.3 Экологическая безопасность

Загрязнение (окружающей среды, природной среды, биосферы) – это привнесение в окружающую среду (природную среду, биосферу) 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.

6.3.1 Анализ влияния объекта на окружающую среду

В процессе хранения углеводородного топлива в открытых емкостях может происходить испарение. Пары нефтепродуктов, как известно, могут содержать значительное количество вредных веществ, таких как оксиды серы и азота. Смешиваясь с воздухом вредные вещества могут нанести серьезный ущерб жизни и здоровью человеческого организма, а также может отразиться на состоянии окружающей среды. Поэтому хранение углеводородного топлива необходимо производить в герметичном закрытом баке.

Дистиллированная вода и смесь поверхностно активных веществ не так губительны для окружающей среды и организма человека, но в целях безопасности и экономии компонентов хранение необходимо производить в герметичных закрытых баках.

6.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Для уменьшения воздействия паров углеводородного топлива и смеси поверхностно активных веществ, выделяющихся при длительном хранении необходимо принять ряд мер по изоляции и герметизации емкостей хранения, а также узлов, производящих перекачку и слив как компонентов в отдельности, так и уже готового эмульсионного топлива. В качестве емкостей хранения необходимо выбирать закрытые баки и уплотнителями на крышках

и местах стыка трубопровода, а в помещениях устанавливать вытяжную систему. Также рекомендуется произвести дополнительные меры по герметизации емкостей и узлов транспортировки

6.4 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.

6.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

В лаборатории и на производстве наибольшую опасность представляет возникновение возгорания. Поскольку топливо необходимо хранить, для дальнейшего сжигания, то существует вероятность воспламенения.

При эксплуатации необходимо контролировать состояние емкостей с горючим путем внешнего осмотра и измерения температуры в них. Признаками самовозгорания являются повышение температуры, появление характерного запаха.

Самой распространенной причиной возникновения пожара является нарушение противопожарных правил. Поэтому персонал должен знать и соблюдать правила пожарной безопасности.

6.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

Особое внимание стоит уделить пожаробезопасности и электробезопасности. При функционировании криостата существуют риски возникновения опасных ситуаций, как и при работе любого высокомоощного электрического прибора. Так как установка работает в режиме нагрев/охлаждение, одним из таких рисков является перегрев оборудования

выше температуры, рассчитанной для его стабильной работы, что может привести к воспламенению экспериментального стенда, а вследствие и лаборатории. Для предотвращения появления такой ситуации необходимо тщательно следить за изменением температуры в насосном отсеке и следить за правильностью подключения к электрической сети. Также, причиной возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с возгоранием помещения, может послужить короткое замыкание в проводке экспериментального стенда. Поэтому, для предотвращения возгорания помещение должно быть оборудовано средствами пожаротушения (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с противопожарным инвентарем), средствами связи.

6.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий 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.

В случае невозможности самостоятельного устранения очага возгорания необходимо вызвать пожарную команду, после чего поставить в известность о случившемся инженера по техники безопасности.

Для тушения пожаров в помещении с компьютерами необходимо применять 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 огнетушитель.

Выводы по разделу Социальная ответственность

В заключение всего вышеперечисленного хочется отметить основную задачу, поставленную данным разделом, – формирование у индивида социальной ответственности перед другими людьми и окружающей его средой обитания, а также необходимости выполнения всех возможных мероприятий, ведущих к улучшению условий окружающего мира. В результате разработки данного раздела были выполнены следующие задачи:

- рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и перечислены организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны;
- выявлены и описаны вредные и опасные факторы, которые могут оказывать воздействие на организм человека;
- проанализировано воздействие процесса формирования топлива на окружающую среду, а также представлены рекомендации по защите окружающей среды;
- проанализированы возможные ЧС, а также описаны меры по их предупреждению и оповещению, а также приведены требования по поведению персонала при ЧС.

Заключение

В рамках магистерской диссертации разработана автоматизированная система подготовки и подачи многокомпонентной жидкости в рабочую зону на основе современных технических средств автоматизации.

Данная система является трехуровневой. На нижнем уровне располагаются технические средства автоматизации: датчики, измерительные преобразователи, исполнительный механизм, а также запорная арматура. На среднем уровне расположен программируемый логический контроллер, представляющий собой регулирующее устройство. Имеется возможность осуществлять дистанционное управление технологическим процессом с верхнего уровня с помощью разработанной SCADA-системы. Разработан перечень проектной документации: составлена структурная схема автоматизированной системы, спроектированы функциональная схема, принципиальная электрическая схема шкафа автоматизации и монтажная схемы внешних проводок, разработан сборочный чертеж шкафа автоматизации, выбраны технические средства, составлена заказная спецификация.

Проведены экспериментальные исследования параметров растекания и короннообразной структуры капель многокомпонентных жидкостей, взаимодействующих с нагретой твердой поверхностью. Изучены реологические и поверхностно-активные свойства исследуемых топливных образцов. На основе проведенных исследований сформулированы рекомендации к разработке и эксплуатации системы. Также проведенные фундаментальные исследования позволяют расширить базу знаний о неоднородных капельных жидкостях.

Проведена оценка ресурсоэффективности и конкурентоспособности разрабатываемой системы. Проектируемая автоматическая система управления имеет большой потенциал, она конкурентоспособна и перспективна. Главным достоинством системы является ее применимость в

условиях использования экологически более чистого многокомпонентного топлива.

Рассмотрено влияние вредных факторов на организм человека и окружающую среду в процессе эксплуатации системы. Разработаны инструкции и мероприятия по устранению и минимизации влияния негативных факторов.

Список публикаций

1. Khomutov N., Misyura S., Piskunov M., Semyonova A., Strizhak P., Volkov R. Convective heat transfer in droplets of fuel microemulsions during conductive heating // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2021. Vol. 120.
2. Piskunov M. V, Semyonova A., Khomutov N, Ashikhmin A., Yanovsky V. Effect of rheology and interfacial tension on spreading of emulsion drops impacting a solid surface // *Physics of Fluids*. 2021. № 8 Vol. 33.
3. Piskunov M., Ashikhmin A., Khomutiv N., Semyonova A. Effects of wall temperature and temperature-dependent viscosity on maximum spreading of water-in-oil emulsion droplet // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 185. 122442.

Список использованных источников

1. Visser C.W. et al. In-air microfluidics enables rapid fabrication of emulsions, suspensions, and 3D modular (bio)materials // *Sci. Adv.* American Association for the Advancement of Science, 2018. Vol. 4, № 1.
2. Oliveira S.M., Reis R.L., Mano J.F. Towards the design of 3D multiscale instructive tissue engineering constructs: Current approaches and trends // *Biotechnol. Adv.* 2015. Vol. 33, № 6, Part 1. P. 842–855.
3. Kamperman T. et al. Single Cell Microgel Based Modular Bioinks for Uncoupled Cellular Micro- and Macroenvironments // *Adv. Healthc. Mater.* 2017. Vol. 6, № 3. P. 1600913.
4. Leijten J., Khademhosseini A. From Nano to Macro: Multiscale Materials for Improved Stem Cell Culturing and Analysis // *Cell Stem Cell*. 2016. Vol. 18, № 1. P. 20–24.
5. Jiang J. et al. Continuous High-Throughput Fabrication of Architected Micromaterials via In-Air Photopolymerization // *Adv. Mater.* 2021. Vol. 33, № 3. P. 2006336.
6. Sreenivasan A., Deivandren S. Splashing of fuel drops impacting on heated solid surfaces // *Phys. Fluids*. AIP Publishing, LLC, 2020. Vol. 32, № 3.
7. Khomutov N. et al. Convective heat transfer in droplets of fuel microemulsions during conductive heating // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2021. Vol. 120. P. 110258.
8. Debnath B.K., Saha U.K., Sahoo N. A comprehensive review on the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015. Vol. 42. P. 196–211.
9. Tan Y.H. et al. Engine performance and emissions characteristics of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol emulsions // *Energy Convers. Manag.* 2017.
10. Piskunov M. et al. Effect of rheology and interfacial tension on spreading of emulsion drops impacting a solid surface // *Phys. Fluids*. 2021. Vol. 33, № 8. P. 83309.
11. Demidovich A. V et al. The Impact of Single- and Multicomponent Liquid

- Drops on a Heated Wall: Child Droplets // Appl. Sci. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 10, № 3. P. 942.
12. Piskunov M.V. et al. Experimental research into collisions of homogeneous and multi-component liquid droplets // Chem. Eng. Res. Des. 2019. Vol. 150. P. 84–98.
 13. Piskunov M. et al. Secondary atomization of water-in-oil emulsion drops impinging on a heated surface in the film boiling regime // Int. J. Heat Mass Transf. 2020. P. 120672.
 14. Ashikhmin A.E. et al. Secondary atomization of a biodiesel micro-emulsion fuel droplet colliding with a heated wall // Appl. Sci. 2020. Vol. 10, № 2.
 15. Watanabe H. et al. Secondary atomization and spray flame characteristics of carbonated W/O emulsified fuel // Fuel. 2016. Vol. 182. P. 259–265.
 16. Ashikhmin A. et al. Properties and Phase Behavior of Water-in-Diesel Microemulsion Fuels Stabilized by Nonionic Surfactants in Combination with Aliphatic Alcohol // Energy and Fuels. 2020. Vol. 34, № 2. P. 2135–2142.
 17. Ashihmin A. et al. Thermal stability control of the water-in-diesel microemulsion fuel produced by using a nonionic surfactant combined with aliphatic alcohols // J. Dispers. Sci. Technol. Taylor & Francis, 2019. Vol. 0, № 0. P. 1–8.
 18. Arpornpong N. et al. Ethanol-in-palm oil/diesel microemulsion-based biofuel: Phase behavior, viscosity, and droplet size // Fuel. 2014. Vol. 132. P. 101–106.
 19. Moon J.H., Kim D.Y., Lee S.H. Spreading and receding characteristics of a non-Newtonian droplet impinging on a heated surface // Exp. Therm. Fluid Sci. 2014. Vol. 57. P. 94–101.
 20. Bhat M., Sakthikumar R., Sivakumar D. Fuel drop impact on heated solid surface in film evaporation regime // Chem. Eng. Sci. 2019. Vol. 202. P. 95–104.
 21. Kompinsky E., Dolan G., Sher E. Experimental study on the dynamics of binary fuel droplet impacts on a heated surface // Chem. Eng. Sci. 2013. Vol. 98. P. 186–194.

22. Liang G., Mudawar I. Review of drop impact on heated walls // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. Vol. 106. P. 103–126.
23. Rioboo R., Marengo M., Tropea C. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces // *Exp. Fluids.* 2002. Vol. 33, № 1. P. 112–124.
24. Bertola V., Brenn G. *Transport Phenomena Across Interfaces of Complex Fluids: Drops and Sprays* // *Transport Phenomena in Complex Fluids* / ed. Burghelca T., Bertola V. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 293–360.
25. Chausalkar A., Kong S.-C., Michael J.B. Multicomponent drop breakup during impact with heated walls // *Int J Heat Mass Transf.* 2019. Vol. 141. P. 685–695.
26. Sen S., Vaikuntanathan V., Sivakumar D. Experimental investigation of biofuel drop impact on stainless steel surface // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2014. Vol. 54. P. 38–46.
27. CLANET C. et al. Maximal deformation of an impacting drop // *J. Fluid Mech.* Cambridge University Press, 2004. Vol. 517. P. 199–208.
28. Mandre S., Brenner M.P. The mechanism of a splash on a dry solid surface // *J. Fluid Mech.* 2012. Vol. 690. P. 148–172.
29. Ma T. et al. A numerical study of spray/wall impingement based on droplet impact phenomenon // *Int. J. Heat Mass Transf.* Elsevier Ltd, 2017. Vol. 112. P. 401–412.
30. Kakaç S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, Fourth Edition. CRC Press, 2020.
31. Kumar A., Mandal D.K. Impact of emulsion drops on a solid surface: The effect of viscosity // *Phys. Fluids.* 2019. Vol. 31, № 102106.
32. Волошенко А.В., Медведев В.В. Технические измерения, приборы и средства автоматизации. Курсовое проектирование: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.
33. Волошенко А.В., Горбунов Д.Б. Проектирование систем автоматического контроля и регулирования. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 104 с.

34. ОВЕН ДТС-И, ОВЕН ДТП-И. Термопреобразователи с унифицированным выходным сигналом 4-20 мА. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://owen.ru/uploads/159/re_dth-i_1-ru-18399-1.4.pdf, – Загл. с экрана.
35. Аналоговые преобразователи температуры с унифицированным выходным сигналом ТХАУ Метран-271, ТСМУ Метран-274, ТСПУ Метран-276. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.emerson.ru/documents/automation-ru-4848882.pdf>, – Загл. с экрана.
36. ТС-1088, ТС-1187, ТС-1288, ТС-1388, ТС-0295. Термопреобразователи сопротивления платиновые и медные. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elemer.ru/files/catalog/glavi/ts.pdf>, – Загл. с экрана.
37. Метран 150RFA расходомер переменного перепада давления. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.emerson.ru/ru-ru/catalog/automation-solutions-ru-ru/metran-150rfa-ru-ru?facet=mfName_ntk_cs%3A%22Metran%22, – Загл. с экрана.
38. Расходомеры переменного перепада давления и первичные элементы Rosemount. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.emerson.com/documents/automation/8B-rosemount-ru-77508.pdf>, – Загл. с экрана.
39. US-800. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://encont.pro-solution.ru/wp-content/uploads/2019/10/1.2.pdf>, – Загл. с экрана.
40. ПДУ-И поплавковые датчики уровня (уровнемеры) с выходным сигналом 4...20 мА. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://owen.ru/product/poplavkovie_datchiki_urovnya_pdu_i, – Загл. с экрана.
41. ЭЛЕМЕР-УРЗ-41. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elemer.ru/catalog/urovnmery-signalizatory-urovnya-i-potoka/urovnmery/elemer-urz-41/>, – Загл. с экрана.

42. Программируемый логический контроллер Элсима-M01. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://elesy.ru/media/525590/elsyma-re_v07.pdf, – Загл. с экрана.
43. ОВЕН. Руководство по эксплуатации ПЛК-73. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://owen.ru/product/plk73>, – Загл. с экрана.
44. Siemens. Руководство по эксплуатации SIMATIC S7-200. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.siemens-pro.ru/components/s7-200.htm>, – Загл. с экрана.
45. Емельянов А.И., Капник О.В. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 400 с.
46. Ключев А.С., Глазов Б.В. Дубровский А.Х., Ключев А.А. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
47. Проектирование внешних электрических и трубных проводок. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ani-studio.narod.ru/BOX/Flash/Study/Automation/HTML-Themes/Theme10.htm>, – Загл. с экрана.
48. Ключев А.С., Глазов Б.В., Миндин М.Б., Ключев С.А. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
49. Проектирование электрических и трубных проводок. РМ 4-6-92 ч. 3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ani-https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293851/4293851760.htm>, – Загл. с экрана.
50. Компактные системные шкафы Rittal CM 51 14.500. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://euro-avtomatika.ru/upload/iblock/890/o_863073.pdf. – Загл. с экрана.
51. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ/
52. ГОСТ 12.0.004-2015. Организация обучения безопасности труда. – Введ. 2017-03-01.

53. ГОСТ 12.0.004-2015. Средства защиты работающих. – Введ. 1990-07-01.
54. ГОСТ 12.0.004-2015. Рабочее место при выполнении работ сидя. – Введ. 1979-01-01.
55. ГОСТ 12.0.004-2015. Зал и кабины операторов. Взаимное расположение рабочих мест. – Введ. 1977-07-01.
56. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
57. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.
58. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
59. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов.
60. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Введ. 1983-07-01.
61. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных.
62. ГОСТ 30331.4-95. Электроустановки зданий. Введ. 1995-07-01.

Приложение А

Опросные листы на технические средства измерения

Таблица А.1 – Опросный лист на термоэлектрический преобразователь

1	Наименование параметра	Температура
2	Позиционное обозначение	1...3
3	Тип прибора	Термоэлектрический преобразователь
4	Контролируемая среда	Жидкость, воздух
5	Диапазон измеряемых температур, °С	От 0 до +100
8	Класс взрывоопасной зоны по ПУЭ	-
9	Класс взрывоопасной зоны по ГОСТ Р 51330.9-99, Федеральному закону от 22.07.2008 г. N123-ФЗ	-
10	Тип взрывоопасной смеси	-
11	Общепромышленное исполнение	Общепромышленное исполнение
12	Защищенность от влаги и пыли	Не менее IP 54
13	Место установки	Лаборатория
14	Вид установки (отдельно монтируемый, на приборной стойке, в приборном шкафу)	Отдельно монтируемый
15	Материал корпуса датчика	Исключающий накопление статического заряда
16	Выходной сигнал	4...20 мА
17	Схема подключения	2-х проводная
18	Класс допуска	2
19	Длина погружаемой части, мм	100
20	Резьба для установки термопреобразователя в гильзу	M20x1,5
21	Номинальная статическая характеристика	K (ХА)
22	Описание комплектно поставляемого кабельного ввода	Экранированный
23	Метрологическая приемка	Поверка
24	Соответствие техническим требованиям СТТ-06.01-33.30.90-КТН-002-1-05, РД-35.240.00-КТН-207-08, ОТТ-17.220.00-КТН-058-09	Да
25	Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)	Да
26	Наличие разрешения на применение на поднадзорных Ростехнадзору производствах и объектах	Да

Таблица А.2 – Опросный лист на расходомер переменного перепада давления

1	Наименование параметра	Расход жидкости
2	Позиционное обозначение	4, 5, 6, 7
3	Контролируемая среда	Жидкость
4	Тип прибора	Датчик переменного перепада давления
5	Температура среды, °С	От 0 до +100
6	Диапазон температуры окружающей среды (Т), °С	От 0 до +50
7	Выходной сигнал датчика, мА	4...20 мА
8	Диапазон измерения, л/ч.	0 до 10
9	Диаметр датчика, мм	35
10	Схема подключения	2-х проводная
11	Предел допускаемой погрешности, %	±0,1
12	Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254-96	Не ниже IP 65
13	Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)	Да
14	Наличие разрешения на применение на поднадзорных Ростехнадзору производствах и объектах	Да

Таблица А.3 – Опросный лист на поплавковый уровнемер

1	Наименование параметра	Уровень жидкости
2	Позиционное обозначение	8
3	Контролируемая среда	Жидкость
4	Тип прибора	Поплавковый уровнемер
5	Температура среды, °С	От 0 до +100
6	Диапазон температуры окружающей среды (Т), °С	От 0 до +50
7	Выходной сигнал датчика, мА	4...20 мА
8	Диапазон измерения, л.	0 до 100
9	Диаметр датчика, мм	35
10	Схема подключения	2-х проводная
11	Предел допускаемой погрешности, %	±0,1
12	Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254-96	Не ниже IP 65
13	Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)	Да
14	Наличие разрешения на применение на поднадзорных Ростехнадзору производствах и объектах	Да

Приложение В
(справочное)

Characteristics of unsteady motion of a water-in-oil emulsion droplet
in collision with a solid heated wall under conditions of convective heat transfer

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Семёнова Александра Евгеньевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Пискунов М.В.	К.ф.-м.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Пташкин А.С.	К.ф.н., доцент		

1 Introduction

In many modern know-hows and practical applications with the main workflows, invariably associated with the collision of groups of drops and sprays with each other and with different surfaces, multicomponent liquids are used to optimally adjust the functionality of the technologies. Three-dimensional printing and bioprinting with cured polymers [1], micro-production of biomaterials [2], production of hydrogels and microgels [3], safe transport of drugs and living cellular structures [4], one-stage production of functional coatings and materials and collision of multiphase liquid fuel with the walls of combustion chambers are among them. Due to significant differences in the properties of liquids, chosen as working ones to implement these technologies, obtaining drops and sprays with a controlled heterogeneous structure becomes the target. The workflows specific for the forming of droplet liquids with complex internal structure and component composition within the framework of technologies have been studied well enough (e.g., various methods of emulsification, encapsulation, polymerization, etc.). However, the interaction of droplets and microdrops of such liquids with surfaces of different properties is a problematic research area with a limited number of known experimental and theoretical works.

It is known that the use of alternative emulsion fuels is a well-studied approach to reducing harmful emissions from the combustion of hydrocarbons without a noticeable decrease in engine performance. The mechanisms, conditions and parameters of this decline have also been studied in great detail. Issues related to the behavior of primary atomized droplets of emulsion (multicomponent) fuels in collision with a wall and among themselves remain poorly studied. The answers to these questions will contribute to the accumulation of knowledge about the secondary fragmentation of droplets of emulsions and microemulsions when interacting with heated surfaces. In turn, such knowledge is of interest for research and technologies for optimizing and controlling the characteristics of fuel atomization in combustion chambers. Their results are ultimately important when

considering the mentioned environmental and energy processes, as well as in general when creating new multiphase liquid fuels.

Another important and little-studied aspect in the study of the behavior of emulsion droplets colliding with a solid surface is the temperature of the latter. In the case of droplets of non-Newtonian liquids (polymer solutions of xanthan gum), the influence of surface temperature is clearly manifested in the properties of the liquid, in particular in a significant change in viscosity, as well as in sharply different dynamic parameters of the drop falling mode. To date, there are well known experimental results on the effect of surface temperature on the maximum spreading coefficient (β_{max}) for drops of traditional single-component and multicomponent fuels (heptane, decane, diesel, Jet A-1 aviation fuel), taking into account the characteristic Weber numbers and the heat exchange mode (film evaporation). The importance of considering the fuel viscosity at temperatures, elevated relative to room temperature due to the liquid heating from the interaction surface, for accurate prediction of the values of β_{max} was substantiated. In addition, when assessing the contribution of the interaction surface temperature to the spreading and runoff of droplets, it is important to consider another influencing factor – the interaction rate.

Thus, since no similar results have been found for emulsion droplets during film evaporation of abovementioned droplets of various fuels and non-Newtonian liquids, the purpose of the work is to determine, based on the results of experimental studies, characteristics of unsteady motion of a drop of a water-in-oil emulsion in collision with a solid heated wall.

2 Experimental

2.1 Materials

To prepare emulsions of the "water-in-oil" type, three main components were used: distilled water as a dispersed phase, *n*-decane hydrocarbon (GOST (SS) 2706.2-74, CAS number: 124-18-5, purity $\geq 99\%$, Kemstor Co., Russia) and base isoparaffin oil HVI-2 (TU 38.401-58-416-2014, PJSC TATNEFT, Tatarstan) as a continuous phase. When oil and *n*-decane were mixed, a homogeneous transparent

liquid was formed. The sorbitan monoleate surfactant (Span 80, Sigma-Aldrich, CAS number 1338-43-8) was used to stabilize the emulsions. The reasons for choosing the components of fuel emulsions were as follows: *n*-decane is a component of gasoline; water is the most common low-boiling component of emulsions; and isoparaffin oil was used in the work to thicken a continuous medium. Compositions with different mass concentrations of components were obtained using these components (Table B.1). The following approaches were used in the study to ensure changes in the viscosity of emulsions: 1) an increase in the proportion of water (dispersed phase) at a fixed concentration of oil as a component of a continuous medium (compositions C1-C3); 2) an increase in the proportion of oil at a fixed small concentration of water (compositions C4-C6). The mean diameter of the dispersed phase micro-droplets of all the emulsions prepared was measured by laser scanning confocal microscopy and was equal to about 2 μm .

Table B.1 – Component composition of the studied emulsions

Composition	Continuous phase		Dispersed phase	Surfactant
	<i>n</i> -Decane (mass%)	Oil HVI-2 (mass%)	Water (mass%)	Span 80 (mass %)
C1	47	30	20	3
C2	37	30	30	3
C3	27	30	40	3
C4	74	20	5	1
C5	34	60	5	1
C6	-	94	5	1

The emulsions were prepared by mixing the components in laboratory glassware. The components were sequentially added to the test tube using the Thermo Scientific Lenpipet Novus electronic dispenser (the dosed volume of 100-1000 μl). ViBRA AJH-420CE analytical scales (working scale range of 0.02...420 g, accuracy of ± 0.01 g) were used to measure the mass of components to ensure their suitable mass concentrations. The emulsifier was dissolved in a continuous phase, then water was added. Mixing of the components was carried out using a Polytron

PT 2500 E homogenizer (working volume range of 0.05...2500 ml, and speed range of 500...30 thousand rpm) for three minutes at a speed of 10 thousand rpm. After vacuum degassing and a short stabilization of the emulsion temperature to the room one, the main experiments were carried out. Additionally, to assess the kinetic stability, the emulsion compositions were thermostated at room temperature (18–22 °C) during the day. The studied compositions proved to be resistant to phase separation in the specified time period and represented a "milk" dispersion.

2.2 Experimental set-up

Experiments on the interaction of an emulsion droplet with a solid heated surface were carried out on an experimental stand (Fig. B.1). The experiments were performed under normal conditions.

The droplet generation system consisted of a LongerPump BT100-1F dosing peristaltic pump (a set dosing volume of 0.01 ml), a Tygon F4040-A feeding tube for pumping hydrocarbon liquids (an inner diameter of 2.03 mm) and a nozzle (a needle with a blunt tip with an inner diameter of 0.184 mm). The initial diameter of the drop D_0 , defined as $D_0 = (D_{hor} + D_{vert}) / 2$, where D_{hor} is the measured value of the drop diameter in the horizontal plane, m, and D_{vert} is the measured value of the drop diameter in the vertical plane, m, was 0.0021 m (2.1 mm). The nozzle was placed in a thermostatically controlled jacket (a metal chamber with a hole for immersion of the nozzle and with fittings for connecting the inlet and outlet pipelines of the cryostat) connected to the CRYO-VT-12-01 cryostat (working fluid – Antifreeze A-40, operating temperature range of -30 ... +200 ° C, and accuracy of temperature maintenance of ± 0.1 ° C), to maintain a constant temperature of the test liquid, 20°C. The temperature of the refrigerant in the vicinity of the needle was monitored by an external temperature sensor (WT-D, temperature measurement range of -50 – 450 ° C, and maximum deviation of ± 0.25 ° C) connected to the cryostat. The temperature jacket with a nozzle was fixed on a linear coordinate device, used to vary the height of the droplet supply H ($H = 0.06; 0.2; 0.55; 0.93$ m),

which served to obtain the rates of interaction of the droplet with the surface $U_0 = 1.2; 2; 3; 3.6 \text{ m/s}$.

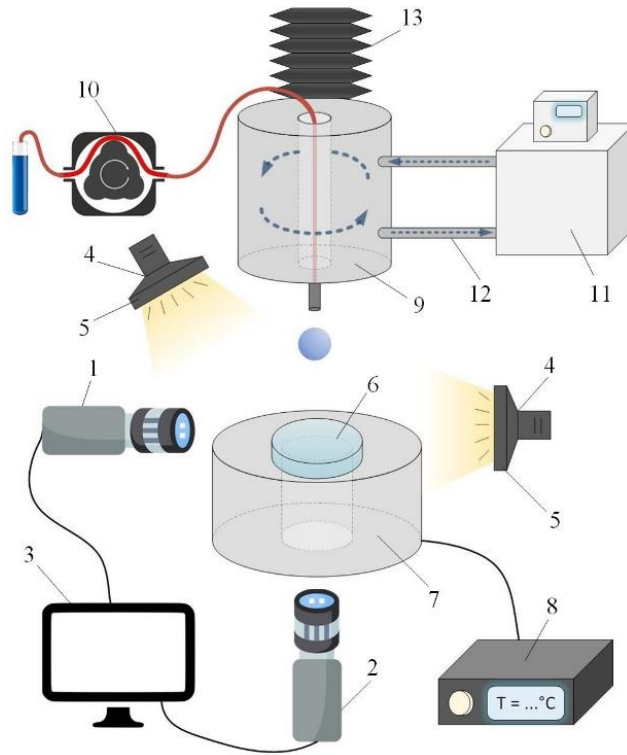


Figure B.1 – Experimental stand: 1, 2 – high-speed video cameras, 3 – PC, 4 – temperature control, 5 – heating element, 6 – substrate, 7 – lighting system, 8 – droplet generation system, 9 – linear coordinate device, 10 – peristaltic pump, 11 – cryostat with external circuit

The drop fell at right angle on a solid optically transparent sapphire substrate (5 mm thick and 25 mm in diameter) with a smooth surface. The substrate was heated from below using a heating element (temperature control by a PID controller in increments of 1°C , the heating operating temperature range of $40\text{--}500^\circ\text{C}$, and the maximum temperature deviation from the set value of $\pm 2^\circ\text{C}$) having a through hole (with a diameter of 20 mm) for video-shooting the collision of droplets with the surface from below. The substrate surface temperature (T_w) was controlled by a type-K thermoelectric converter, Omega Engineering (USA) and Testo 885-2 thermal imager (with a preset degree of sapphire glass blackness of 0.96) and was $T_w = 20, 40, 60, 80^\circ\text{C}$ (the deviations of the thermocouple readings from the thermal imager

did not exceed 2.5 °C). Shooting of the interaction process was carried out both from below and sidewise at an angle of 90° relative to the axis of the drop fall using two high-speed video cameras: Phantom Miro M110 (shooting speed of 1900 frames/s, and resolution of 640 × 480 pixels) and Phantom Miro M310 (shooting speed of 10000 frames/s, and resolution of 768 × 304 pixels), respectively. The background illumination system for providing high-speed "shadow" video shooting consisted of a GSVITEC MultiLED G8 power supply and two GSVITEC MultiLED QT spotlights with diffusers for light scattering.

2.3 Methods

The density of the studied liquids (Table B.2) was measured by the pycnometric method based on the average density values within the framework of five measurements. To measure the effective viscosity of the compositions, the following equipment was used: a personal computer with the Brookfield Rheocalc T software, Termex CRYO-VT-12-1 cryostat, Brookfield DV3T-LV rotary viscometer (accuracy of ± 1%, and measuring range of 1...6·10⁶ MPa·s) complete with a Small Sample Adapter (SSA adapter) and a spindle SC4-18. The SSA adapter was designed to measure viscosity on small volume samples, from 2 to 16 ml. To maintain a constant temperature of the composition (20°C), the external circuit of the cryostat was connected to the SSA adapter. Temperature control was provided using a thermocouple built into the SSA adapter (operating temperature range of -15...+100 °C). In the considered ranges of shear rates emulsions C1, C2, C4-C6 may be treated as Newtonian liquids, because the values of their effective viscosity changed negligibly (calculations for each of these emulsions used the average value of dynamic viscosity in the considered range of shear rates). Since the viscosity of the C3 emulsion varied (decreased) several times in the considered range of shear rates, and the dependence of the shear stress on the shear rate was well described by the Herschel-Bulkley rheological model ($\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$, where τ is the shear stress, Pa, τ_0 is the limiting shear stress, Pa, n is the flow index, k is the consistency index,

$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$, and $\dot{\gamma}$ is the shear rate, $1/\text{s}$), this liquid was defined as prone to non-Newtonian behavior. The values of dynamic viscosity for *n*-decane, base isoparaffin oil and distilled water, as well as for the studied emulsions (Table B.2).

Table B.2 – Values of density, viscosity and surface tension coefficient for the studied liquids

Liquid	Density at 20 °C, kg/m^3	Viscosity at 20 °C, $\text{mPa}\cdot\text{s}$	Surface tension at 20 °C, mN/m
Distilled water	997	0.89	72.12 ± 0.02
<i>n</i> -Dean	730	0.84	24.60 ± 0.02
Isoparaffin oil	824	7.41	48.06 ± 0.01
C1	829	3.20	24.33 ± 0.02
C2	850	5.78	24.63 ± 0.02
C3	867	–	25.13 ± 0.01
C4	792	1.70	23.95 ± 0.03
C5	823	4.36	25.72 ± 0.03
C6	854	16.0	28.04 ± 0.03

The surface tension coefficient at the “air-liquid” interface was measured using a Kruss K20 tensiometer (accuracy of $\pm 1\%$, and measuring range of $1\ldots 999 \text{ mN}/\text{m}$) by the du Noüy ring method. Three series of measurements were carried out for each composition. The series included from 5 to 10 automatic measurements. Measurements were automatically interrupted if the difference between the measured and averaged value became less than or equal to the specified standard deviation. The device calculated the average value of the surface tension for a series of measurements. To maintain a constant temperature of the composition during measurements at 20 °C, a thermostatically controlled jacket (a hollow cylinder with a bottom, in the walls of which the coolant circulates, and with fittings for the supply and discharge of the coolant) was developed and produced by means of 3D printing. A reaction container with the liquid under study was immersed into this jacket, which was connected to the external circuit of the cryostat. The temperature control of the coolant was provided by a thermoelectric converter of K type (operating temperature range of $-15 \ldots +100 \text{ }^\circ\text{C}$), built into a thermostatically controlled jacket.

The results of measurements of the surface tension at the “liquid-air” interface for the studied liquids are presented in Table B.2.

The parameters of the interaction of a liquid drop with a surface determined in the study are as follows: the diameter of the spreading drop D and the height of the spreading drop h in each frame, m; the spreading coefficient β ($\beta = D / D_0$); the maximum spreading coefficient β_{max} ($\beta_{max} = D_{max} / D_0$, where D_{max} is the maximum diameter of the drop spreading, m); the drop height coefficient ζ ($\zeta = h / D_0$); the minimum drop height coefficient ζ_{min} ($\zeta_{min} = h_{min} / D_0$, where h_{min} is the minimum drop height, m); the dimensionless interaction time t^* ($t^* = tU_0 / D_0$, where t is the interaction time, s).). In addition, the study determined the following characteristics of the droplet splashing in collision with the surface: the maximum values of the height H_{cor}^{max} and diameter D_{cor}^{max} of the corona-like structure (at the time of its maximum disclosure, excluding secondary fragments that have already separated by this time), m, separated from the interaction surface; the dimensionless maximum height $H_{cor}^* = H_{cor}^{max} / D_0$) and diameter ($D_{cor}^* = D_{cor}^{max} / D_0$) of the corona-like structure.

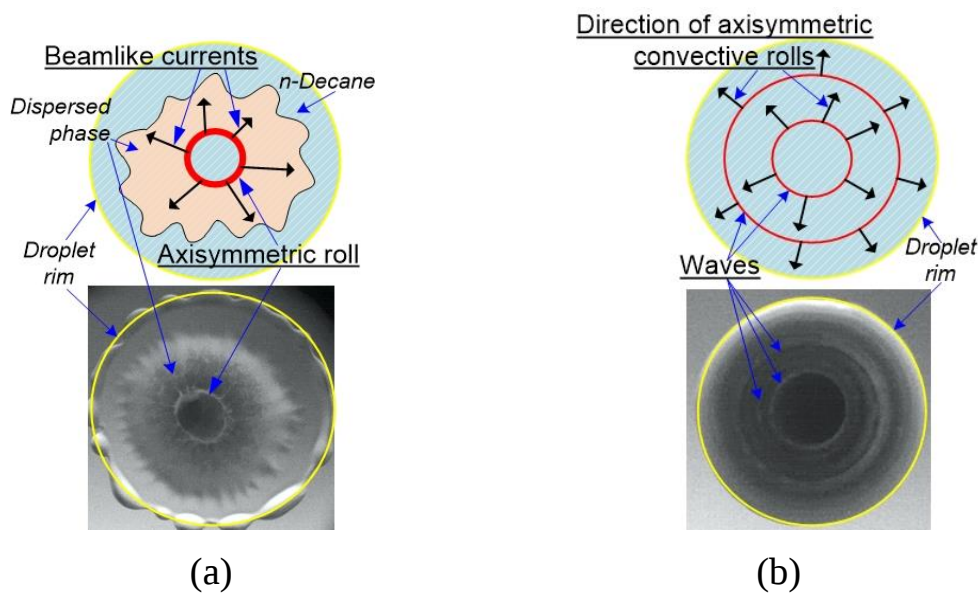
To analyze the results of the experimental study, the dimensionless criteria of hydrodynamic similarity were calculated, namely, the Weber number ($We = \rho U_0^2 D_0 / \sigma$, where ρ is the density, kg/m³, and σ is the surface tension coefficient, N/m), characterizing the ratio of inertia forces to the surface tension forces of the liquid; the Reynolds number for Newtonian fluids ($Re = \rho U_0 D_0 / \mu$, where μ is the dynamic viscosity, Pa·s), representing the ratio of inertia forces to viscosity forces; Reynolds number for non-Newtonian fluids ($Re_n = \rho D_0^n U_0^{2-n} / k$, where n and k are the parameters obtained according to the Herschel-Bulkley model), Ohnesorge number ($Oh = We^{1/2} / Re$), as a more complex dimensionless parameter equal to the ratio of viscosity forces to surface tension and inertia forces; Brinkman number ($Br = \mu U_0^2 / [\lambda(T_w - T_L)]$, where λ is the coefficient of thermal

conductivity), representing the similarity criterion in hydrodynamics, equal to the ratio of the energy, lost by a liquid due to viscous dissipation during spreading, to the energy, transferred to the liquid from heated interaction surface.

3 Results and discussion

3.1 Morphological observations

The features of the flow of convective rolling structures, visualized naturally due to the presence of dispersed phase particles in emulsions, were considered at numbers of $We = 100\text{--}900$ and surface temperatures $T_w = 40\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$. It was found at $We=100$, that at the late stages of the wetting phase for drops of emulsions C1, C2, C4 and C5 at temperatures $T_w = 40\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$, an axisymmetric roll is formed in the center of the spreading drop; from the roll convective flows develop in the form of short segments (beams) directed radially (Figure B.2a, the roll is highlighted in red, the arrows show the direction of propagation of convective flows). For drops of more viscous emulsions C3 and C6, there is the forming of axisymmetric convective rolls visually generating a wavy motion directed radially to the rim of the drop (Figure B.2b, waves are highlighted with red lines, arrows show the direction of the rolls, and the yellow line corresponds to the rim of the drop).



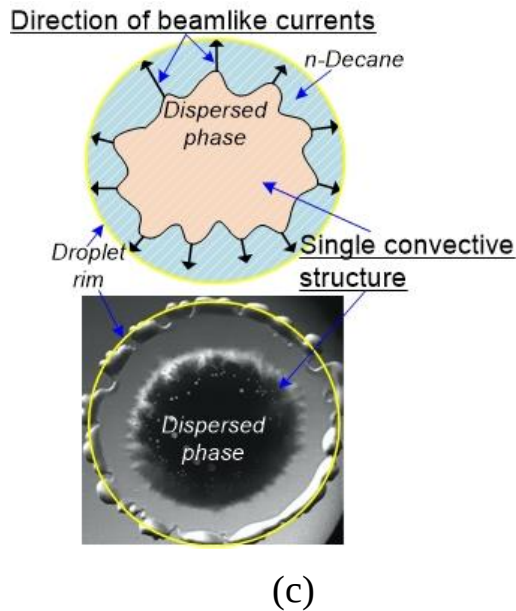


Figure B.2 – Structures of convective flows (diagram from above, frame of the real process from below) in drops of emulsions C1-C6 in the wetting phase of the surface after collision with the latter at $T_w=40-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $We=100-900$: (a) – formation of an axisymmetric roll in the center of the drop and radially directed beam-like currents; (b) – radially directed wavy motion of axisymmetric convective rolls; (c) – development of a single convective structure with beam-like currents without axisymmetric roll in the center of the drop

At $We = 300$ and at $T_w = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, no rolling structures are observed for viscous emulsions C3 and C6; the drop spreads evenly over the surface. For drops of emulsions C1, C2, C4 and C5 convective rolling structures are weakly manifested or completely absent. At $T_w=60-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ for drops of emulsions C1, C2, C4 and C5 during wetting, an axisymmetric roll is formed in the center of the spreading drop and beam-like currents directed radially from the roll (Figure B.2a). Then such a flow pattern is transformed into a single convective structure, i.e., without a central roll, disappearing during wetting (Figure B.2b), but with beam-like currents. This structure, represented by particles of the dispersed phase, increases in size over the wetting time. A single structure with wavy motion is formed in drops of more viscous emulsions (C3 and C6) at $T_w=60-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure B.2b). In the cases of $We=600$ and $We=900$, convective rolls were not observed for all compositions at T_w

=40 °C. At $T_w=60-80^\circ\text{C}$, a single convective structure with beam-like currents develops for compositions C1, C2, C4 and C5 (Figure B.2c). With an increase in viscosity (emulsions C3 and C6), wetting is accompanied by wavy motion (Figure B.2b).

The derived conclusions directly link the features of development of the flow of convective rolling structures inside the emulsion droplets with the characteristics of their spreading at late stages after the damping of inertia-driven motion, as well as indirectly link them with the temperature dependence of the liquid properties (due to changes in T_w).

3.2 Spreading characteristics

When analyzing video data and quantitative results for the diameter of the droplet spreading, it was found that for drops of emulsions, *n*-decane and isoparaffin oil interacting with a smooth surface, the characteristic was the absence of droplet runoff after reaching the maximum spreading diameter (Figure B.3), which at the same time was specific for water droplets. Instead of this process, a short stationary position of the droplet was observed (the relaxation phase or, in this case, a more correct name will be the "plateau", since during relaxation, the spreading diameter can change) with maximum spreading. It was replaced by an equilibrium phase, accompanied by wetting a smooth surface with a liquid with a slow increase in the spreading coefficient β (with a maximum slope of β , close to the behavior of $\sim t^{*1/6}$ in the case of *n*-decane and $\sim t^{*1/10}$ in the case of oil and emulsions) mainly under the action of a capillary effect, depending on the surface properties of a particular liquid. Such results were obtained regardless of We and T_w .

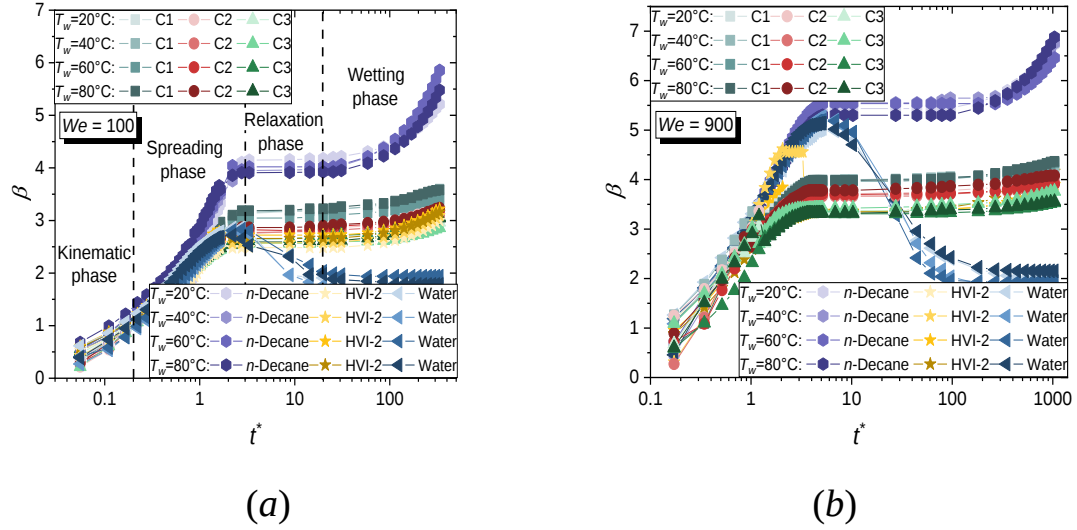


Figure B.3 – Droplet spreading coefficient as a function of dimensionless time at $We = 100$ (a) and $We = 900$ (b)

The spreading coefficient of droplets of the liquids under consideration β as a function of dimensionless time, taking into account changes in T_w and We , is shown in Figure B.3. At relatively low Weber numbers ($We = 100$ (Fig. B.3a) and $We = 300$), droplets spread over the surface without splashing. At higher Weber values ($We = 600$ and $We = 900$), the spreading process was accompanied by splashing with the formation of a corona-like structure, from which secondary microdroplets were subsequently separated. Since at $We = 900$, the breakup of the corona-like structure was associated with the formation of a significant number of secondary microdrops, this led to a barely noticeable decrease in the β coefficient in the spreading phase after the breakup (see insert of Figure B.3b). At the same time, at $We = 600$, the splashing was less intense, so there was no significant change in the β coefficient before and after the breakup of the corona-like structure, i.e., a small number of secondary fragments were separated, and their entrainment during spreading slightly affected the change in the spreading diameter.

From the results obtained, the following main conclusion has been made. In contrast to the spreading coefficients for droplets of single-component and multicomponent hydrocarbon fuels that are very sensitive to changes in surface

temperature T_w^* , this study takes no notice of any substantial heating effect on β during film evaporation of droplets of the liquids in question, interacting with a surface heated to $T_w = 20\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$. The latter is apparently due to an insignificant change in the rheological and surface-active properties of the studied liquids in the vicinity of the boundary layer and to reasonably consistent driving forces of the spreading process in such a rather narrow temperature range ($20\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$). At the same time, with an increase in We , the maximum spreading coefficient β_{max} increases in all cases, similar to the whole spreading coefficient β over the entire range of observations t^* , which fits well with the known results for droplets of homogeneous liquids, including liquid fuels.

The results obtained for emulsions turn out to be quite close to the values for biofuel droplets (a mixture of Jet A-1 and diesel fuel with components of biological origin). At that, an expression well-known in the literature and explaining the behavior of β_{max} when changing We for drops of homogeneous single-phase liquids (water and mercury), $\beta_{max} = We^{1/4}$, does not convincingly describe the results obtained in the study for drops of emulsions, *n*-decane and isoparaffin oil. In the study, the power function for scaling the behavior of β_{max} for droplets of the studied liquids with a change in We has the following general form (equation (B.1)):

$$\beta_{max} = C \cdot We^{0.12}, \quad (\text{B.1})$$

where C is the coefficient that increases with decreasing viscosity of liquids. The accuracy of the approximation for the droplets of all the studied liquids is $R^2 > 0.96$.

Thus, the values of β_{max} also depend on the ratio of inertia forces and fluid viscosity, based on the unambiguous behavior of the C coefficient. In order to simultaneously take into account the influence of viscosity forces, surface tension and inertia in the behavior of the β_{max} coefficient, a dimensionless We/Oh complex is introduced for the direct scaling of the β_{max} values (Figure B.4). The obtained dependence is fairly accurate (the relative average discrepancy between the experimental and predicted β_{max} is 4.97) is described by a power function of the form:

$$\beta_{max} = 0.82 \left(\frac{We}{Oh} \right)^{0.15} \quad (2)$$

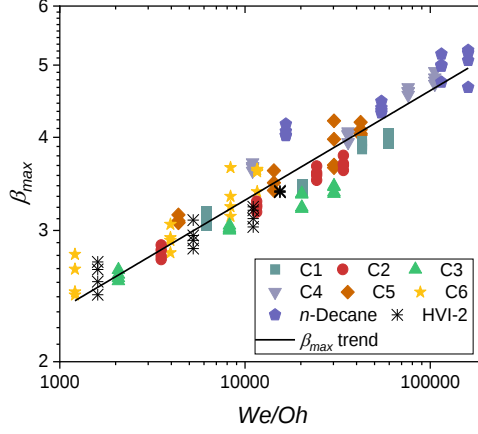


Figure B.4 – The effect of the complex parameter We/Oh , taking into account the main driving forces of the droplet spreading on the values of β_{max}

The study also considers other parameters of droplet spreading. The minimum height of the spreading drop h_{min} is taken into account using the integral parameter of maximum spreading ζ_{min}/β_{max} . Similar to the case of β_{max} , a more pronounced dependence of the ζ_{min}/β_{max} parameter on the Re number than on the We number is established; in addition, scaling through the complex parameter We/Oh is proposed in a similar way (Figure B.5). The obtained dependence is satisfactorily described (the approximation accuracy $R^2=0.91$, and the relative average discrepancy between the experimental and predicted ζ_{min}/β_{max} is 14.11) by a power function in the form of expression (B.3).

$$\zeta_{min} / \beta_{max} = 0.79 \cdot \left(\frac{We}{Oh} \right)^{-0.35} \quad (B.3)$$

The introduction of the integral parameter of maximum spreading ζ_{min}/β_{max} serves to obtain a qualitative assessment of the state (essentially, geometric dimensions) of droplets of homogeneous and inhomogeneous (emulsions) liquids at the time of maximum spreading during film evaporation under conditions of convective heat exchange, as well as at a given initial ratio of all the main driving forces of the process.

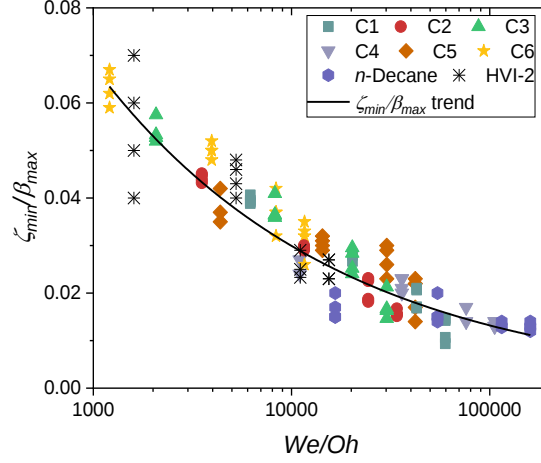


Figure B.5 – The influence of the complex parameter We/Oh on the values of the integral parameter of the liquid droplet spreading ζ_{min}/β_{max}

3.3 Corona splashing characteristics

In the course of the studies, the geometric characteristics of the corona-like structure were measured during corona splashing of the considered drops of the emulsions and isoparaffin oil at $We = 600$ and $We = 900$. These included the dimensionless height H_{cor}^* and diameter D_{cor}^* of the corona-like structure at the moment of its maximum opening, without taking into account the secondary fragments already formed by this moment due to the instability of the "floating" Taylor rim. These parameters were measured in the study because they reflect the splashing potential of a continuous metastable floating fluid flow. Water droplets at all the studied We were deposited without the formation of a corona-like structure and, in general, without the formation of secondary fragments. For n -decane droplets at $We = 900$ there was prompt splashing due to the formation of secondary microdrops from a radially spreading Taylor rim caused by Rayleigh-Taylor instability. The trajectory of these microdrops was almost parallel to the plane of the interaction surface, in contrast to the trajectory of microdrops moving away from the surface. In this study, the analysis of the characteristics of prompt splashing was not carried out.

In the experiments, a physically legitimate pattern of H_{cor}^* and D_{cor}^* growth was observed even at an increased value of We ($We=900$), associated with a greater contribution of inertia forces. It was also found that the integral parameter $H_{cor}^{max} / D_{cor}^{max}$, which simultaneously takes into account both geometric characteristics of the corona-like structure, is satisfactorily described by the Re number with confidence $R^2 = 0.72$ and the relative average discrepancy (RME) between experimental and predicted values $H_{cor}^{max} / D_{cor}^{max}$, equal to 14.36, in the form of expression (B.4). However, a more important result is, in our opinion, a noticeable almost linear trend of a decrease in the values of the geometric characteristics of the corona-like structure with an increase in the surface temperature T_w^* during the interaction of emulsion droplets. Physically, this means that the corona-like structure exists at lower temperatures for a longer time. Thus, the temperature of the interaction surface during convective heat exchange affects the properties of the liquids in the drop, which, in turn, determine the lifetime of the corona as an integral structure. At that, the geometric characteristics of the corona, as a rule, increase in proportion to the time of its life. Such a trend is not observed for oil drops.

$$H_{cor}^{max} / D_{cor}^{max} = 0.0013 \cdot Re^{0.5}; \quad (B.4)$$

We assume that using the dimensionless Brinkman number Br in this situation would allow us to take into account the effect of conductive heating from the interaction surface on the geometric parameters of the corona, along with the obvious contribution of the liquid viscosity. The reasoning is that this is the parameter that essentially determines the heat transfer from the heated interaction surface to the spreading (moving) viscous liquid through the ratio of heat produced by viscous dissipation to heat transferred by molecular conduction (thermal conduction). Figure B.6a demonstrates an increase in the parameter D_{cor}^* with an increase in the values of the Br number according to the power function (RME=13.38) described by equation (B.5). This behavior is explained by the increase in the Br number, associated with an increase in the viscosity of the liquid

and a decrease in the temperature of the interaction surface. The latter, as already shown above, contributes to the longer existence of the corona as an integral structure; it is known that emulsification, in general, delays the splashing of droplets due to the dominance of viscosity forces. An increase in the viscosity of the liquid serves as a manifestation of greater resistance to irreversible deformation and subsequent instability of the corona-like structure. In such conditions, the growth of D_{cor}^* values at large Br numbers becomes natural. Similar reasoning most likely applies to the data in Figure B.6b as well. At that, the decrease in the values of the integral parameter $H_{cor}^{max}/D_{cor}^{max}$ is associated with relatively less significant differences of H_{cor}^{max} for different liquids at different temperatures relative to the D_{cor}^{max} values under the same conditions (Figure B.6ab). Expression (B.6) rather qualitatively characterizes the behavior of the $H_{cor}^{max}/D_{cor}^{max}$ parameter as a function of the Br number.

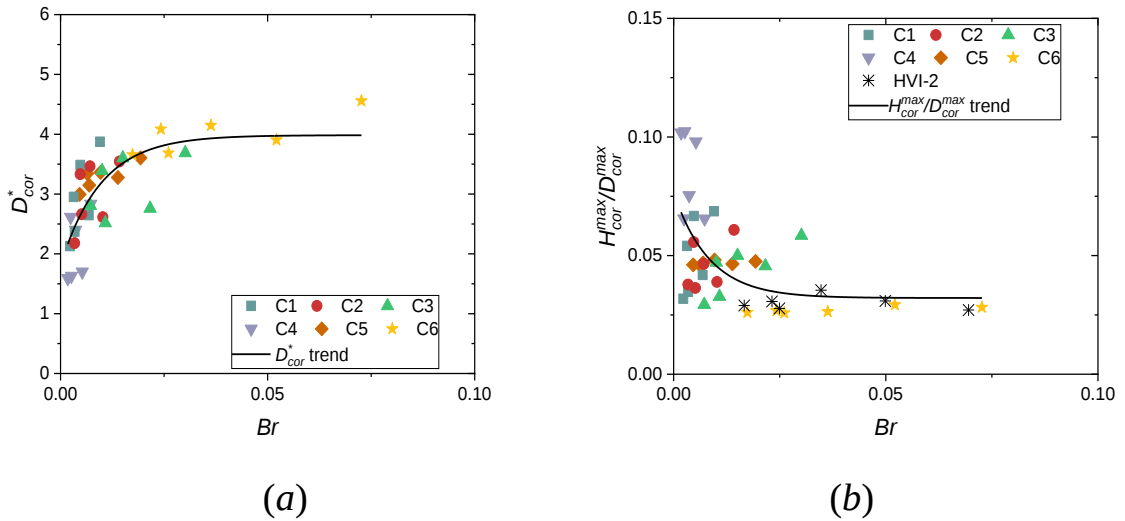


Figure B.6 – Corona parameters D_{cor}^* (a) and $H_{cor}^{max}/D_{cor}^{max}$ (b) depending on the Br number

$$D_{cor}^* = 3.98 - 2.17 \cdot (5.2 \cdot 10^{-45})^{Br} \quad (B.5)$$

$$H_{cor}^{max} / D_{cor}^{max} = 0.03 + 0.04 \cdot (3.36 \cdot 10^{-52})^{Br} ; \quad (B.6)$$

The obtained results allow us to qualitatively predict the behavior of the corona-like structure after the interaction of emulsion droplets with a solid surface heated to 80 °C at $We = 600$ and $We = 900$ by determining the ratio between the viscous dissipation energy for the flow of the spreading liquid and the energy (heat) transferred to the liquid from the heated surface due to molecular (thermal) conduction.

References

1. Visser C.W. и др. In-air microfluidics enables rapid fabrication of emulsions, suspensions, and 3D modular (bio)materials // Sci. Adv. American Association for the Advancement of Science, 2018. T. 4, № 1.
2. Oliveira S.M., Reis R.L., Mano J.F. Towards the design of 3D multiscale instructive tissue engineering constructs: Current approaches and trends // Biotechnol. Adv. 2015. T. 33, № 6, Part 1. C. 842–855.
3. Kamperman T. и др. Single Cell Microgel Based Modular Bioinks for Uncoupled Cellular Micro- and Macroenvironments // Adv. Healthc. Mater. 2017. T. 6, № 3. C. 1600913.
4. Leijten J., Khademhosseini A. From Nano to Macro: Multiscale Materials for Improved Stem Cell Culturing and Analysis // Cell Stem Cell. 2016. T. 18, № 1. C. 20–24.