



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

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Физико-технический

Направление подготовки Физика

Кафедра Общей физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование горения жидкого топлива с учётом теплового излучения в камере сгорания

УДК 519.876:536.23:621.45.034-63

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	Шылгаубаева Ляззат Бакыткызы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ОФ	Лаптев Роман Сергеевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЭБЖ	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Общей физики	Лидер Андрей Маркович	к.ф.-м.н.		

Результаты обучения

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>		
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-7), критерий 5 АИОР
P2	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.	Требования ФГОС(ОК-6, ПК-11), критерий 5 АИОР
P3	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.	Требования ФГОС (ОК-2, ОК-4), критерий 5 АИОР
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.	Требования ФГОС (ОК-3), критерий 5 АИОР
P5	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности.	Требования ФГОС (ОК-5), критерий 5 АИОР
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P6	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-1), критерий 5 АИОР
P7	Принимает участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики низких температур, конденсированного состояния и материаловедения, а также в	Требования ФГОС (ПК-2), критерий 5 АИОР

	модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных и тепловых свойств твердых, жидких и газообразных веществ.	
P8	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4), критерий 5 АИОР
P9	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики конденсированного состояния, низких температур и сжижения природного газа.	Требования ФГОС (ПК-3), критерий 5 АИОР
P10	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ОК-4, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9), критерий 5 АИОР
P11	Умеет интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решает задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований.	Требования ФГОС (ОК-5, ПК-10), критерий 5 АИОР

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Физико-технический
 Направление подготовки – Физика
 Кафедра – Общей физики

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой
 _____ Лидер А.М.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ11	Шылгаубаева Л.Б.

Тема работы:

Моделирование горения жидкого топлива с учётом теплового излучения в камере сгорания
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ol style="list-style-type: none"> 1. Установка SimFlow - это программное обеспечение для Computational Fluid Dynamics (CFD), предназначенное для инженерных и научных целей. 2. Жидкое топливо гептан. 3. Результаты моделирования анализируются и интерпретируются, что помогает лучше понять физические процессы, происходящие в системе сгорания жидкого топлива.
<p>Перечень подлежащих исследованию¹, проектированию и разработке</p> <p>Вопросов</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Исследование процесса горения жидкого топлива с учетом теплового излучения позволяет определить оптимальные параметры системы, такие как время горения, распределение тепловых нагрузок, эффективность сгорания и выбросы вредных веществ. 2. Моделирование процесса горения жидкого топлива с учетом теплового излучения с помощью численных методов является важным инструментом для научных исследований, разработки и оптимизации систем сгорания и повышения их эффективности и безопасности. 3. Проведение моделирование и обсуждение результатов.

	Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение Социальная ответственность
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
4. Финансовый менеджмент,	Маланина Вероника Анатольевна

ресурсоэффективность ресурсосбережение	и	
5.Социальная ответственность		Сечин Андрей Александрович

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Лаптев Р.С.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	Шылгаубаева Л.Б.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ11	Шылгаубаева Ляззат Бакыткызы

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 «Физика»

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 1,2 млн. руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 600 тыс. руб
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4,4 баллов из 5
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала и инновационного потенциала НТИ	Анализ и оценка конкурентоспособности НИ FAST-анализ SWOT-анализ
2. Разработка устава научно-технического проекта	НТИ выполнено в рамках выпускной квалификационной работы, разработка устава не требуется
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Формирование плана и графика разработки: определение структуры работ, контрольные события проекта, разработка графика Гантта. Формирование бюджета затрат на НИ: материальные затраты, амортизационные отчисления, заработная плата, отчисления на социальные цели, производственные командировки, накладные расходы.
4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение эффективности проекта (оценка результатов)

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

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

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Маланина Вероника Анатольевна	К.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
--------	-----	---------	------

ОБМ11	Шылгаубаева Ляззат Бакыткызы		
-------	------------------------------	--	--

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

Группа		ФИО	
ОБМ11		Шылгаубаева Ляззат Бакыткызы	
Школа	Инженерная школа энергетики	Кафедра	Общей физики
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика

Тема ВКР:

Моделирование горения жидкого топлива с учётом теплового излучения в камере сгорания	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> Создание математической модели процесса горения жидкого топлива (гептана) в камере сгорания</p> <p><i>Область применения:</i> Разработка двигателей внутреннего сгорания</p> <p><i>Рабочая зона:</i> производственное помещение</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> Компьютер и программное обеспечение, Лабораторное оборудование</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> Сбор и анализ данных, Разработка моделей, Вычислительное моделирование, Анализ результатов и валидация моделей, Оптимизация и улучшение процессов горения.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением; РД 34.40.509-903. Типовая инструкция по эксплуатации систем регенерации высокого давления энергоблоков мощностью 100-800 МВт; ТК РФ Статья 351.6. Особенности регулирования труда работников в сфере электроэнергетики, сфере теплоснабжения, в области промышленной безопасности, области безопасности гидротехнических сооружений; Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда.</p>
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Струи жидкости, воздействующие на организм работающего при соприкосновении с ним; 2. Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека; 3. Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов. 4. Ударные волны воздушной среды; 5. Производственные факторы, связанные с повышенным уровнем ионизирующих излучений; 6. Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий; <p>Вредные факторы:</p>

	<ol style="list-style-type: none"> 1. Повышенный уровень общей вибрации; 2. Повышенный уровень локальной вибрации; 3. Повышенный уровень шума; 4. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения; 5. Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего; 6. Монотонность труда, вызывающая монотонию; 7. Длительное сосредоточенное наблюдение. <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: Вентиляционные системы: Обеспечивают подачу свежего воздуха и отвод отработанных газов и продуктов сгорания. Целью является обеспечение нормализации состава воздуха в рабочей зоне и предотвращение скопления опасных концентраций газов.</p> <p>Расчет: расчет численных моделирование жидких топлив</p>
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: радиоактивное заражение территории при аварии</p> <p>Воздействие на литосферу: твердые радиоактивные отходы</p> <p>Воздействие на гидросферу: сброс охлаждающей воды при использовании в качестве охладителя рек, прудов; жидкие радиоактивные отходы</p> <p>Воздействие на атмосферу: выбросы из вентиляционных систем, содержащие низкие концентрации радиоактивных веществ; тепловое воздействие вследствие испарения части охлаждающей воды</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</p>	<p>Возможные ЧС: Природные катастрофы (наводнения, цунами, ураган и т.д.); Геологические воздействия (землетрясения, оползни, обвалы, провалы территории и т.д.); Техногенные аварии (отказ систем безопасности; нарушение контроля и управления цепной ядерной реакции в активной зоне реактора; тепловой взрыв с выбросом радиоактивных веществ, пожар)</p> <p>Наиболее типичная ЧС: тепловой взрыв с выбросом радиоактивных веществ</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Сечин Андрей Александрович	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	Шылгаубаева Ляззат Бакыткызы		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Физико-технический
Направление подготовки – Физика
Уровень образования – Магистр
Кафедра – Общей физики
Период выполнения – (осенний / весенний семестр 2021/2023 учебного года)

Форма представления работы:

Моделирование горения жидкого топлива с учётом теплового излучения в камере сгорания

магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата Контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
28.02.17	1 Литературный обзор	20
15.03.17	2 Методика эксперимента	25
30.03.17	3 Результаты и их обсуждение	25
15.04.17	4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
30.04.17	5 Социальная ответственность	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Лаптев Р.С.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Общей физики	Лидер А.М.	к.ф.-м.н. доцент		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 97 страницы 16 рисунков и 8 таблиц.

Ключевые слова: Численное моделирование, горение жидкое топливо, камера сгорания, программа SimFlow 4.0

Цель работы – Изучение влияния теплового излучения на процесс горения жидкого топлива в камере сгорания.

Для исследований были использованы модель P1 теплового излучения, так как она является самой простой и понятной для новичков в данной области. Эта модель применяется для описания распространения излучения в трехмерном пространстве и основана на уравнениях переноса излучения, которые описывают изменение интенсивности излучения в пространстве и времени.

Проведена разработка методики. Полученные результаты позволяют лучше понять процессы, происходящие в камере сгорания, и использовать эту информацию для разработки более эффективных и экологически безопасных систем сгорания. Дальнейшие исследования в этой области помогут совершенствовать модели и методы, а также применять их на практике для достижения оптимальных результатов.

Оглавление

INTRODUCTION.....	14
1. BASIC PRINCIPLES OF COMBUSTION.....	15
1.1 liquid fuel and its combustion (types of fuel).....	21
1.2 Combustion of liquid fuel.....	29
1.3 Математическая модель горения жидких топлив, впрыскиваемых в камеру сгорания при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса	34
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ О ГОРЕНИИ ВПРЫСКА ЖИДКОГО ТОПЛИВА	38
2.1 Модель испарения, горения и столкновения капель.....	40
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ВПРЫСКА ЖИДКОГО ГЕПТАНА С УЧЕТОМ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ	47
3.1 Физические и химические свойства гептана.....	49
3.2 Программа Sim Flow 4.0.....	50
4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ	50
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	54
5.1 ПРЕДПРОЕКТНЫЙ АНАЛИЗ.....	55
5.1.1 ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОТРЕБИТЕЛИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	55
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений	56
5.2 Swot-АНАЛИЗ.....	59
5.2.1 Оценка готовности проекта к коммерциализации	61
5.2.2 Инициация проекта	68
5.2.3 Цели и результаты проекта	69
5.2.4. Организационная структура проекта	70
5.3 Планирование научно-исследовательских работ	75
5.3.1 Структура работ в рамках научного исследования	78
5.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ	83
6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	90
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:	92
6.2. Производственная безопасность при эксплуатации:.....	94
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации	96
6.4 Выводы по главе	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ:	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104

INTRODUCTION

Simulation of the combustion process of liquid heptane injection taking into account thermal radiation in the combustion chamber using numerical methods.

This part of the work considers modeling of the combustion process of liquid heptane injection in the combustion chamber taking into account thermal radiation. To achieve this goal, numerical methods will be used that allow detailed and accurate modeling of such a complex process. At the beginning of the work, an overview of existing studies and models related to the combustion of liquid heptane will be conducted. Various approaches and methods used for combustion modeling, including accounting for thermal radiation, will be considered. Then a numerical model based on the equations of conservation of mass, momentum, energy and mass fractions of components will be proposed. This model will take into account the interaction of fuel with an oxidizer, combustion processes and the formation of combustion products. Special attention will be paid to the modeling of thermal radiation, which plays an important role in the combustion process.

After the development of the model, a numerical study of the combustion process of liquid heptane injection in the combustion chamber will be carried out. Parameters such as temperature distribution, component concentrations, and combustion rates will be analyzed. The influence of various factors such as injection rate, ambient temperature and oxygen concentration will also be investigated. Finally, conclusions will be drawn based on the results of modeling and possible ways of further research in this area will be proposed.

1. BASIC PRINCIPLES OF COMBUSTION

The basic principles of burning play a key role in understanding the process of fuel combustion and its interaction with the environment. Here are some reformulations of the basic principles of combustion known as the fire triangle. These components include a combustible substance (fuel), an oxidizer (usually oxygen from the air) and a heat source (ignition). If at least one of these components is missing or their concentration is insufficient, combustion cannot occur. Maintenance of combustion: In order to maintain burning, the continuous presence of three main components is necessary. When the fuel and oxidizer are in certain proportions and a sufficiently high temperature is reached,

combustion becomes a self-sustaining process. Heat exchange: combustion is accompanied by the transfer of heat from the source of combustion to the environment. Heat is transferred through the processes of thermal conductivity, convection and radiation. This heat exchange affects the rate of combustion and the ambient temperature. Activation energy: To start combustion, it is necessary to overcome the activation energy, which is the minimum energy required to initiate the combustion reaction. After overcoming the activation energy, a chain reaction of combustion occurs, as a result of which additional heat is released.

Combustion products: Combustion produces products that depend on the composition of the fuel and the conditions of combustion. Common combustion products include carbon dioxide (CO₂), water (H₂O), nitrogen oxides (NO_x) and other harmful substances, depending on the composition of the fuel and the presence of impurities. Reaction zones: During combustion, various zones are distinguished, such as the pre-combustion zone, the main combustion zone and the post-combustion zone. Each of these zones has its own characteristics and plays a certain role in the combustion process. Pre-combustion zone: This is the initial phase of burning, where the fuel is prepared for complete combustion. In this zone, the fuel is heated and its fusible components evaporate.

Main combustion zone: This is the area where the main combustion reaction occurs with the release of a significant amount of heat and combustion products. This is the most intense zone, and the main products of combustion are formed here.

Post-combustion zone: This is the phase that follows the main combustion. In this zone, combustion products that were not completely burned in the previous zones are subjected to additional oxidation. This allows you to maximize the use of fuel and reduce the amount of incomplete combustion. Combustion products: combustion produces products that depend on the composition of the fuel and the conditions of combustion. The usual combustion products are carbon dioxide (CO₂), water (H₂O), nitrogen oxides (NO_x) and other harmful substances. Each zone has its own characteristics and various chemical and physical processes associated with fuel combustion occur in it.

Kinetics of combustion studies the rate of chemical reactions that occur during combustion. It depends on factors such as temperature, reagent concentration, contact

surface, pressure and other conditions. The study of combustion kinetics allows us to optimize the combustion processes and increase efficiency.

Combustion and stoichiometry: Stoichiometry of combustion determines the optimal ratio between fuel and oxidizer for complete combustion. This ratio is called stoichiometric. If there is an excess of fuel, incomplete combustion occurs, and if there is a lack of fuel, there is no combustion.

Influence of combustion conditions: Combustion conditions such as temperature, pressure, oxygen concentration and turbulence have a significant impact on the combustion rate, products and efficiency of the process. Optimal combustion conditions make it possible to achieve maximum efficiency and reduce emissions of harmful substances.

Combustion regulation allows you to control the speed and intensity of the fuel combustion process. This is important to ensure safety, efficiency and minimize emissions of harmful substances. Regulation can be carried out by changing the fuel supply, oxidizer, temperature, aeration and other parameters.

These principles of combustion play an important role in various fields such as energy, industry, aviation and road transport. Understanding these principles helps to develop efficient combustion systems and minimize the negative impact of combustion on the environment.

Combustion and heat exchange interaction: Combustion is closely related to the processes of heat exchange. During burning, a significant amount of heat is released, which is transferred to the environment. The interaction of burning and heat exchange affects the efficiency of the combustion process, the distribution of heat in the system and temperature conditions.

Flaming and explosion hazard: Uncontrolled combustion can lead to flaming or explosions. Flaming is the independent combustion of fuel without an external ignition source. It can occur under certain conditions when fuel and oxidizer are mixed in certain proportions. The explosion hazard occurs when burning spreads rapidly at high speed and with large energy releases.

Physical and chemical properties of fuels: Different types of liquid fuels have different physical and chemical properties that affect their combustion. This includes viscosity,

density, flash point, ignition temperature and the content of various chemical components. Understanding these properties helps optimize combustion processes and select the most appropriate fuel for specific applications.

Emissions and pollution of the environment: Burning of liquid fuel is accompanied by emissions of harmful substances that can negatively affect the environment and human health. Emission control and pollution reduction are important aspects in the development and use of combustion systems. This may include the use of gas emission purification technologies, optimization of combustion processes and the transition to more environmentally friendly fuels.

The role of catalysts in combustion: catalysts can play an important role in the process of liquid fuels burning. They are able to accelerate chemical reactions, improving combustion efficiency and reducing the formation of harmful emissions. Catalysts can be used both inside the burner and in emission purification systems to increase the efficiency and environmental safety of the combustion process.

Influence of environmental conditions: Environmental conditions such as temperature, pressure and oxygen content also have an impact on the combustion process of liquid fuels. For example, low oxygen content can lead to incomplete combustion of fuel, which leads to the formation of carbon monoxide. Understanding and controlling these factors allows you to optimize combustion process to achieve the desired results.

Innovations in the field of liquid fuel combustion: Modern research and development in the field of liquid fuels combustion are aimed at finding new approaches and innovative solutions. This may include the development of new fuel compositions, the use of new combustion technologies, the use of renewable and environmentally friendly energy sources, and other areas. Innovations contribute to increasing efficiency, saving resources and reducing the harmful impact on the environment.

Safety during storage and use: Liquid fuel is a potentially hazardous material that requires compliance with safety measures during its storage and use. This includes proper storage, handling of flammable substances, the use of special containers and equipment, as well as training of personnel on safety rules. Compliance with these measures helps to prevent possible accidents and ensure safety when working with liquid fuel.

Further development and improvement of liquid fuel combustion processes is expected in the future. Some prospects in this area include:

Environmental efficiency: Due to the growing need for environmentally friendly energy sources, research is aimed at developing and applying new technologies that will reduce emissions of harmful substances and improve the environmental efficiency of burning liquid fuels.

Use of alternative energy sources: The development of alternative energy sources, such as solar and wind energy, can reduce dependence on liquid fuels. However, even with the development of renewable energy sources, liquid fuels may remain in demand in some industries that require high energy density and long-term energy storage.

Improving combustion technologies: Research is aimed at improving liquid fuel combustion technologies to increase its efficiency and reduce emissions. This may include the development of more efficient burners, improved emission control systems, and the application of new methods for modeling and optimizing combustion processes.

Development of fuel compositions: Research is also being conducted in the field of developing new fuel compositions with improved combustion characteristics. This may include the addition of catalysts to improve combustion efficiency, the use of biofuels or synthetic fuels, as well as the development of specialized formulations for specific applications.

Integration with other technologies: In addition to improving the combustion processes of liquid fuels, research is also aimed at integrating these processes with other technologies. For example, integration with cogeneration systems is possible, where the heat released as a result of the burning of liquid fuel can be used to produce electricity or other useful types of energy. Integration with waste incineration systems is also possible, which makes it possible to use liquid fuel for waste disposal and simultaneously receive energy.

Development of control and automation: Modern control and automation technologies play an important role in optimizing improved combustion processes of liquid fuel. The development of monitoring, diagnostics and regulation systems makes it possible to increase the efficiency and reliability of combustion systems, as well as to ensure safety and minimize environmental impact.

The definition and compliance with relevant norms, standards and regulations play an important role in the field of liquid fuel combustion. The regulation is aimed at ensuring safety, environmental protection and ensuring the quality of improved combustion processes. It also facilitates the interaction between manufacturers, operators and control authorities.

Exploring new approaches: New approaches to the combustion of liquid fuels are constantly being explored to achieve more efficient and environmentally friendly results. For example, combustion processes using supercritical conditions, aerosol combustion, plasma combustion and other innovative methods are investigated.

Training and exchange of experience: Training and exchange of experience in the field of combustion of liquid fuels play an important role in improving processes and professional development of specialists. The organization of conferences, seminars and educational programs promotes the dissemination of knowledge, the transfer of best practices and stimulates further research and innovation.

Development of control and automation: Modern control and automation technologies play an important role in optimizing combustion processes of liquid fuel. The development of monitoring, diagnostics and regulation systems makes it possible to increase the efficiency and reliability of combustion systems, as well as to ensure safety and minimize environmental impact.

Exploring new approaches: New approaches to the combustion of liquid fuels are constantly being explored to achieve more efficient and environmentally friendly results. Gorenje Gorenje, for example, investigates combustion processes using supercritical conditions, aerosol combustion, plasma combustion and other innovative methods.

Training and exchange of experience: Training and exchange of experience in the field of gorenje liquid fuels play an important role in improving processes and professional development of specialists. The organization of conferences, seminars and educational programs promotes the dissemination of knowledge, the transfer of best practices and stimulates further research and innovation.

Regulation and standardization: The development and compliance with relevant norms, standards and regulations are important aspects in the field of liquid fuel combustion.

Regulation contributes to ensuring safety, environmental protection and the quality of combustion processes, and facilitates interaction between manufacturers, operators and control authorities.

1.1 liquid fuel and its combustion (types of fuel)

Liquid fuel and its combustion are an important research topic that has wide application in various industries, including energy, aviation, automotive and industry. In this context, the burning of liquid fuel means the process of converting liquid fuel into a gaseous state when interacting with an oxidizer, usually air.

Liquid fuel, such as gasoline, diesel fuel, kerosene, fuel oil and others, is a mixture of hydrocarbons of various fractions. During combustion of liquid fuel, its oxidation occurs in the presence of oxygen, which leads to the release of energy in the form of heat and light.

The combustion process of liquid fuel usually consists of several stages. The first stage is fuel evaporation, in which the surface of the droplet heats up and the fuel begins to evaporate. Then follows the mixing of fuel vapors with an oxidizer (air), forming a combustible mixture. When the ignition temperature is reached, the combustible mixture begins to burn, releasing heat, light and combustion products. The organization of liquid fuel combustion requires certain conditions to ensure the efficiency and safety of the process. This includes proper atomization of the fuel to form fine droplets and their uniform mixing with the oxidizer. In addition, temperature control, the ratio of fuel and oxidizer, as well as combustion rate are important factors for achieving optimal results.

The study of the combustion of liquid fuel has significant practical application, as it allows you to optimize the burning processes, increase the efficiency and economy of fuel use, as well as improve environmental safety. A lot of research is being conducted to develop new combustion technologies and improve existing systems, including the development of more efficient burners, improved fuel spraying methods, control of the combustion process and reduction of emissions of harmful substances.

One of the main problems when burning liquid fuel is the formation of incomplete combustion products, such as carbon particles, nitrogen oxides and sulfur. These substances are air pollutants and can have a negative impact on the environment and

human health. Therefore, the development of combustion methods that minimize the formation of these harmful substances is an important task.

An important aspect of the combustion of liquid fuel is also the study of its kinetics. Studying combustion rate, flame structure, characteristics of heat fluxes and interaction with the environment allows you to understand and optimize the combustion processes more deeply. This is especially important when developing new types of fuels or when using alternative energy sources.

In addition, safety is an important aspect when handling and burning liquid fuels. The presence of substances with high ignition temperatures and explosive properties requires compliance with certain precautions during storage, transportation and use.

As a result, the study of liquid fuels combustion is an important area of research, which includes various aspects, from physical and chemical processes to optimization of technical systems. This makes it possible to develop more efficient and environmentally friendly methods of using liquid fuels, contributing to sustainable development and reducing the negative impact on the environment.

Another important aspect of the combustion of liquid fuel is its energy efficiency. Liquid fuel contains chemical energy that can be released during combustion and used to set various mechanisms in motion or to generate electrical energy. The optimal use of this energy requires the development of efficient combustion systems and the conversion of thermal energy into mechanical or electrical form.

Depending on the specific type of liquid fuel, the combustion process may have its own characteristics. For example, when burning oil or fuel oil in boilers or power plants, the liquid fuel first evaporates and mixes with air, and then the mixture is ignited and burns in a gaseous state. At the same time, it is important to ensure an even mixing of fuel and air in order to achieve optimal combustion and maximum efficiency.

One of the key factors in the combustion of liquid fuel is the availability of sufficient oxygen to maintain the reaction. The air in which burning occurs contains about 21% oxygen, which plays the role of an oxidizer. If there is a lack of oxygen or insufficient mixing of fuel with air, incomplete combustion may occur, which leads to the formation of harmful products and a decrease in the efficiency of the process.

Various systems are used to ensure the efficient combustion of liquid fuel, such as fuel atomizers, air supply systems, temperature and pressure control, as well as control and monitoring systems for the combustion process. This makes it possible to achieve optimal combustion conditions and ensure stable and safe operation of the system.

Different types of liquid fuels have different combustion properties, which affects their application and efficiency. For example, gasoline, diesel fuel, and fuel oil have different ignition temperatures and combustion rates.

The ignition temperature determines the minimum temperature at which the liquid fuel will start burning in the presence of an ignition source. The higher the ignition temperature, the more stable the fuel is and less prone to spontaneous combustion. For example, gasoline has a low ignition temperature and can easily ignite from a spark or a heat source, while fuel oil requires a high temperature to ignite.

Combustion rate determines how fast the process of fuel combustion takes place. This is due to the kinetics of reactions, oxygen concentration, thermal and mass exchange during combustion. Some types of liquid fuels, such as diesel fuel, burn slower, so they are widely used in diesel engines, where long-term combustion is required to ensure high efficiency.

Optimal combustion of liquid fuel is achieved with the correct mixture of fuel and air. For this purpose, nozzle systems and air supply systems are used, which ensure uniform atomization of fuel and its mixing with air to achieve a stoichiometric mixture. This allows the fuel to burn completely and ensures high efficiency and low harmful emissions. An important aspect of liquid fuel combustion is also the control of burning process to ensure stable operation and prevent undesirable phenomena such as detonation or flame attenuation. For this purpose, systems for automatic control and regulation of combustion parameters, such as temperature, pressure and composition of the gas mixture, can be used.

In the field of research and development related to liquid fuels and their burning new technologies and materials to improve efficiency, reduce emissions and develop alternative energy sources are actively introduced. Some of these technologies include the use of biofuels, the gasification of liquid fuels, the use of supercritical conditions and low-

nitrogen oxide combustion technologies.

In general, research and development in the combustion of liquid fuels are aimed at improving efficiency, reducing emissions and developing more sustainable and environmentally friendly combustion systems. This makes it possible not only to use the energy of liquid fuel efficiently, but also to reduce its negative impact on the environment. Liquid fuel is one of the most important and widely used energy sources. Its combustion plays a key role in various fields, including industry, motor transport, energy and heating. In the context of the dissertation research, the study of various types of liquid fuels and their combustion is a significant topic that can contribute to the development of new energy solutions, optimization of combustion processes and reduction of negative impact on the environment.

Types of liquid fuel:

Gasoline: Gasoline is one of the most common types of liquid fuel used by internal combustion of car engines. It has a high calorific value and flash point, which makes it suitable for use in spark-ignition engines. However, gasoline can also be flammable and requires strict safety measures when storing and using it.

Diesel fuel: Diesel fuel is used in diesel engines and has a higher calorific value compared to gasoline. It usually has a higher density and requires specific injection systems to ensure efficient combustion. Diesel fuel also has a higher self-ignition point, which allows the use of compression ignition in diesel engines.

Kerosene is a light liquid fuel widely used in the aviation industry. It has a high calorific value and allows you to achieve high combustion speeds in jet engines.

Turbo fuel: Turbo fuel is a special type of liquid fuel developed for use in gas turbine engines. It has a high calorific value and specific characteristics that ensure efficient combustion and operation of gas turbine installations. Turbo fuel usually has a high octane index and special additives that improve its burnability and stability.

Biofuels: Biofuel is a type of liquid fuel obtained from vegetable or animal sources, such as grains, sugar, vegetable oil, etc. It is an alternative to petroleum products and represents a more environmentally friendly and sustainable source of energy. Biofuels can be used in

a mixture with traditional fuels or as pure biodiesel.

Gasoline: Gasoline, or autogas, is a gaseous form of fuel that can be used in gas engines. It usually consists of propane and butane, and has a high calorific value. Gasoline is a more environmentally friendly type of fuel compared to gasoline or diesel fuel, since its combustion does not emit such an amount of harmful emissions.

Synthetic fuel: Synthetic fuel is a type of liquid fuel produced by the chemical conversion process of hydrocarbons, such as natural gas, coal or biomass. It can be produced using various technologies, such as gasification, Fischer synthesis or the GTL (gas to liquid) process. Synthetic fuel has a high calorific value and can be used in various types of engines, including automobile and aircraft engines.

Hydrocellulose fuel: Hydrocellulose fuel is a type of liquid fuel derived from cellulose contained in plant material such as wood, stems and leaves of plants. The process of converting cellulose into fuel is called the cellulosic ethyl process (CEP). Hydrocellulose fuel has a low sulfur and nitrogen content, as well as reduced greenhouse gas emissions, which makes it a more environmentally friendly fuel option.

Rocket fuel: Rocket fuel is a special type of liquid fuel developed for use in rocket engines. It has a high calorific value and specific chemical properties that allow it to achieve high speeds and thrust. Rocket fuel can be hypergolic (consisting of components that burn themselves when mixed) or reactive (requiring an external oxidizer). Examples of rocket fuels are kerosene, liquid oxygen, hydrogen and other specific combinations of chemicals.

Nanofuel: Nanofuel is an innovative type of liquid fuel that uses nanoparticles or nanomaterials. Nanoparticles can be added to conventional fuel to improve its characteristics, such as thermal conductivity, energy efficiency and combustion stability. This opens up new opportunities to improve the efficiency and environmental sustainability of existing fuel combustion systems. For example, nanofuels can be used in cars to increase engine power and reduce emissions of harmful substances.

Biofuels: Biofuels are a type of liquid fuel produced from biological sources such as vegetable oil, ethyl alcohol or biomass. It is a renewable and environmentally friendly alternative energy source. Biofuels can be used in various industries, including automotive

transportation and power generation. It has the advantages of reducing greenhouse gas emissions and dependence on oil resources.

Aviation fuel: Aviation fuel is a specially developed type of liquid fuel used in the aviation industry to power aircraft engines. It has a high calorific value and special chemical properties necessary to ensure safe and efficient flight. Aviation fuel is often based on kerosene or jet fuel and must meet strict safety and quality standards set by international organizations.

Fuel for nuclear reactors: Fuel for nuclear reactors is a special type of liquid or granular fuel used in nuclear power plants for the production of electricity. It contains nuclear materials such as uranium, plutonium or thorium, which are sources of nuclear energy. Fuel for nuclear reactors is used in the process of fission of atomic nuclei, which releases a large amount of energy in the form of heat. This fuel ensures stable operation of nuclear reactors and has a high calorific value.

Gas fuel: Gas fuel is a type of fuel that is in a gaseous state under normal conditions of temperature and pressure. It can be used in various industries, including industry, heating and transport. Examples of gas fuels include natural gas, propane, butane, and methane. Gas fuel has a high calorific value and clean combustion, which makes it a more environmentally sustainable option compared to traditional liquid or solid fuels.

Electric fuel: Electric fuel is a new type of fuel that uses electricity as an energy source to drive various devices and vehicles. In electric fuel, electrical energy is stored in batteries or used directly for the operation of electric motors. This is an environmentally friendly type of fuel, since there are no emissions of harmful substances or greenhouse gases when using it.

Hydrogen fuel: Hydrogen fuel is a type of fuel that uses hydrogen as the main energy source. Hydrogen can be liquefied (LX) or compressed (VD) for use in a variety of applications, including automobiles, aviation and industry. The main advantage of hydrogen fuel is its high energy density and zero greenhouse gas emissions during combustion. However, the production, storage and distribution of hydrogen present technical and economic challenges that require further research and development.

Biogas: Biogas is a type of fuel that is obtained by the biological decomposition of

organic materials such as manure, food waste or plant biomass. The decomposition process takes place in special installations called biogas or biomethane installations. Biogas consists mainly of methane and carbon dioxide, and it can be used to produce heat and electricity. Biogas is a renewable and environmentally friendly type of fuel that contributes to the reduction of greenhouse gas emissions and the disposal of organic waste.

Hydrogenerator fuel: Hydrogenerator fuel is a type of fuel that is produced by mixing water and a combustible substance such as hydroethylite or hydroxylite. Upon contact with water, the combustible substance produces a reaction, releasing hydrogen, which is then used to power a generator or other devices. Hydrogenerator fuel has low greenhouse gas emissions and can be used in various applications, including cars and stationary sources of electricity.

Fuel emulsions: Fuel emulsions are mixtures of liquid fuels and water, where small water droplets are evenly distributed in the fuel. The emulsion is formed by mechanically mixing fuel and water using special devices or by adding emulsifiers. Such a mixture can be used in various combustion systems, including automobile engines and boilers for heating. Fuel emulsions have a number of advantages, including reduced emissions of nitrogen oxides (NO_x) and particles, as well as improved combustion efficiency.

Mixed fuels: Mixed fuels are combinations of two or more fuels that are mixed in certain proportions. It can be a mixture of various types of liquid fuel, for example, biodiesel and diesel fuel, or a mixture of liquid and gas fuel. The purpose of creating mixed fuels may be to improve the characteristics of existing fuels, such as increasing the cetane number or reducing emissions of pollutants. Mixed fuels can be used in various industries, including automotive and industrial sectors.

Ammonia fuel: Ammonia fuel is a type of fuel whose main component is ammonia (NH₃). Ammonia is a nitrogen-rich chemical compound and can be obtained from hydrogen and nitrogen using the Haber process. Ammonia fuel has a high calorific value and low greenhouse gas emissions, which makes it a potentially environmentally sustainable fuel option. Currently, research is underway on the use of ammonia fuel in cars, ships and other modes of transport.

Fuel cells: Fuel cells are devices that convert the energy of a chemical reactor directly into electrical energy. They work based on an electrochemical reaction in which a fuel such as hydrogen or methane is oxidized using oxygen or another oxidizer. Fuel cells can be used in various fields, including stationary energy sources, vehicles and portable devices. They have high energy efficiency, low emissions and can operate more quietly and without harmful emissions than traditional energy sources.

Argon fuel: Argon fuel is a type of fuel that uses argon as the main component. Argon is an inert gas and is widely used in the industry for welding and cutting metals. Argon fuel is used in the TIG welding process (Tungsten Inert Gas), where argon serves as a protective gas that prevents metal oxidation during heating. This process ensures high quality of welded joints and is widely used in industry, the automotive industry and shipbuilding.

Coke fuel: Coke fuel is a type of fuel obtained from coke, a solid residue after oil distillation in the process of coke production or coal coking. Coke fuel has a high calorific value and is used in industry, especially in steelmaking and heating processes. Coke fuel usually has a low sulfur content and can be used in special combustion systems where high temperature and long-term gorenje are required.

Liquid natural gas fuel (LNG): Liquid natural gas fuel (LNG) is a type of fuel obtained from natural gas by its condensation. Natural gas is liquefied at very low temperatures and pressures, which leads to the formation of a liquid form. LNG has a high energy density and is convenient for storage and transportation, since its volume decreases during the transition to the liquid phase. LNG is used in various fields, including the automotive industry, heating and industrial use. It is considered a more environmentally friendly fuel option, since the emissions of harmful substances during its combustion are less compared to traditional fuels.

Fuel Briquettes: Fuel briquettes are compact fuel blocks made of compressed organic materials such as wood, coal or straw. They are an alternative to traditional fuels such as firewood or coal. Fuel briquettes have a high calorific value and long-term burning. They are widely used for heating houses, stoves and boilers. The advantages of fuel briquettes are their compactness, convenience of storage and less ash and emissions during

combustion.

Solar fuel: Solar fuel is a type of fuel derived from solar energy using solar panels or solar thermal systems. Solar energy is converted into electrical energy or heat, which can then be used in various applications. This includes solar panels for electricity generation and solar collectors for water heating or heating. Solar fuel is a clean and renewable energy source, reduces greenhouse gas emissions and helps in the fight against climate change.

1.2 Combustion of liquid fuel

Combustion of liquid fuels is a chemical process of oxidation of liquid fuels, in which energy is released in the form of heat and light. Combustion of liquid fuels usually occurs in the presence of oxygen from the air and is accompanied by the formation of a flame.

The process of liquid fuels combustion begins with the evaporation of fuel. When a liquid is heated, its molecules acquire sufficient energy to transition to a gaseous state. The resulting fuel vapors are mixed with oxygen from the air and form a combustible mixture.

Then, in the presence of an ignition source, the ignition of the combustible mixture occurs.

Ignition can be carried out by means of a spark, high temperature, flame and other sources. After the ignition of the combustible mixture, the process of liquid fuel combustion develops further. The following main reactions occur inside the flame:

Oxidation: Liquid fuel reacts with oxygen to form carbon oxides (CO or CO₂) and water

(H₂O). The oxidation reaction releases a large amount of energy in the form of heat.

Light release: During the combustion process, some chemical compounds, such as carbon atoms or soot, can be heated to high temperatures and emit light. This leads to the appearance of a bright flame.

Radical reactions: During burning, free radicals such as hydroxyl (OH) radicals are formed, which play an important role in further chemical reactions of combustion.

The combustion process of liquid fuel can be described using three main stages:

Initial phase: In this stage, the fuel evaporates and mixes with oxygen from the air, forming a combustible mixture. The ignition source (for example, a spark) causes the ignition of the combustible mixture and the formation of a flame.

Main phase: In this stage, the flame spreads and ensures the continuation of burning.

Oxidation reactions and heat generation occur. The heat released in this process keeps the

flame going and keeps burning.

The final phase: As the fuel is depleted, burning slows down and eventually stops. The flame disappears, and the remnants of burning, such as ash or soot, may remain.

The combustion of liquid fuels is also accompanied by the formation of emissions, which may include carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxides (NO_x), sulfur oxides (SO_x) and other pollutants. These emissions can have a negative impact on the environment and human health. Therefore, modern technologies and emission purification systems are used to reduce harmful emissions from the combustion of liquid fuels.

In general, liquid fuels combustion is a process in which oxidation and energy release from the fuel occurs. This is one of the main ways of using liquid fuels to generate heat and energy, and it is widely used in various spheres of human activity.

The combustion of liquid fuels is a chemical process that results in the oxidation of fuel in the presence of oxygen. The main components of liquid fuels, such as gasoline, diesel fuel, fuel oil and propane, contain hydrocarbons, which are the main sources of energy during burning.

The combustion process of liquid fuel begins with its evaporation and the formation of combustible vapor. The steam is then mixed with oxygen from the air, which creates a combustible mixture. Under the influence of a spark, a heat source or another initiator, the ignition of the combustible mixture occurs, and active burning begins.

During the combustion of liquid fuels there is a release of heat and light, which is the result of chemical reactions of oxidation of hydrocarbons. The main combustion reaction is the combination of hydrocarbon with oxygen, which results in the formation of carbon dioxide (CO₂) and water (H₂O). At the same time, a significant amount of thermal energy is released, which can be used for various purposes, for example, to drive engines, heat rooms or generate electricity.

The combustion of liquid fuels also generates emissions that may contain harmful substances such as nitrogen oxides, sulfur oxides and solid particles. To reduce harmful emissions, various purification and filtration systems are used, which help to improve the environmental efficiency of the combustion process of liquid fuels.

In addition, it is important to take into account the combustion efficiency of liquid fuels,

which is determined by factors such as the ratio of fuel and oxygen, the burning temperature, the presence of a proper fuel supply system and sufficient ventilation. Optimal combustion conditions contribute to the full use of fuel energy and reduce emissions.

The ignition temperature of a liquid fuel, such as oil or fuel oil, is higher than its boiling point. This means that when a drop of fuel oil enters the high temperature region, it evaporates when heat is transferred from the surface of the drop. Then the formed fuel vapors are mixed with the surrounding air, heated to the ignition temperature and burn in a gaseous state. Thus, at a certain distance from the drop, a stoichiometric ratio between the combustible gas and oxygen is achieved, and here a combustion front is formed, which, when combustion in a stationary environment, is a sphere around the drop. Typically, the distance from the drop to the combustion front is 4-10 drop radii. From the drop to the combustion front, there is an intense movement of evaporating fuel vapors, where there is practically no oxygen. In the combustion zone, a chemical equilibrium is reached between the fuel and the oxidizer, and after it, the burning of the fuel residues and the removal of combustion products occurs. At the same time, the oxidizer diffuses in the direction of the combustion zone. The concentrations of fuel vapors (C_t) and oxidizer (S_{ap} , oxygen) decrease sharply within the combustion zone due to an intense oxidative reaction, and in this area the temperature of the medium (T) reaches its maximum. The combustion of fuel vapor proceeds in accordance with the laws of chain reactions.

The organization of liquid fuel combustion includes its initial spraying in the nozzle until the formation of the smallest droplets, the size of which does not exceed 1.0-1.5 mm (the average size of the droplets is about 0.3-0.5 mm), with simultaneous uniform distribution in the flow of hot air coming out of the burner. In the process of mixing with air and further movement of the resulting mixture, liquid fuel droplets quickly warm up due to thermal radiation from the flare core and convective heat exchange with the gas-air medium. The initial temperature of the drop is approximately 120-140 °C, while the environment has a temperature of 300 to 500 °C. When the surface of the drop reaches the evaporation temperature of the most volatile components of liquid fuel (for fuel oil - from 200 to 320 °C), the process of its evaporation begins.

The Sreznevsky law, also known as the Sreznevsky-Mayer law, is an empirical dependence describing the process of evaporation of a drop of liquid fuel. This law was established on the basis of experimental studies and allows you to predict the evaporation time of a drop based on its initial diameter.

The Sreznevsky law states that the evaporation time of a drop is directly proportional to the square of its initial diameter. Mathematically, this can be represented as follows: the evaporation time (t) is equal to the proportionality coefficient (k) multiplied by the square of the initial diameter of the drop (d). Thus, $t = k * d^2$.

The Sreznevsky law has an important practical application in the development and optimization of liquid fuel combustion systems. It allows you to estimate the evaporation rate of the droplet and determine the necessary parameters, such as the burning time, fuel supply and distribution of droplets in the burner. This makes it possible to achieve more efficient combustion and reduce emissions of harmful substances.

The Sreznevsky law is one of the key empirical dependencies in the study of the combustion of liquid fuels and is widely used in scientific and engineering research related to thermodynamics and combustion processes.

The Sreznevsky law states that the evaporation time of a drop is directly proportional to the square of its initial diameter. Mathematically, this can be represented as follows: the evaporation time (t) is equal to the proportionality coefficient (k) multiplied by the square of the initial diameter of the drop (d). Thus, $t = k * d^2$.

ПООБТОР! The Sreznevsky law has an important practical application in the development and optimization of liquid fuel combustion systems. It allows you to estimate the evaporation rate of the droplet and determine the necessary parameters, such as the burning time, fuel supply and distribution of droplets in the burner. This makes it possible to achieve more efficient gorenje and reduce emissions of harmful substances.

Sreznevsky's law is one of the key empirical dependencies in the study of gorenje liquid fuels and is widely used in scientific and engineering research related to thermodynamics and combustion processes.

When organizing the combustion of liquid fuel, it is important to ensure its effective spraying and uniform mixing with air. This is achieved with the help of special burners

that provide the smallest atomization of fuel in the form of droplets no larger than 1.0-1.5 mm, the average size of the droplets is 0.3-0.5 mm. The sprayed fuel droplets are then mixed with a stream of hot air. In the process of mixing with air, liquid fuel droplets are warmed up due to the thermal radiation of the torch and convective heat exchange with the surrounding gas-air environment. The initial temperature of the drop is approximately 120-140 °C, while the environment has a temperature in the range of 300-500 °C. As the droplet surface heats up, the evaporation temperature of the lowest boiling fractions of liquid fuel is reached, and the process of their evaporation begins. When a drop of liquid fuel evaporates, fuel vapors are formed, which mix with the surrounding air. Then this ready-made gas fuel composition moves forward towards the combustion front. In this area, an intense oxidation reaction occurs, in which fuel vapors burn. The temperature in the combustion zone reaches its maximum. Behind the combustion front, the combustion of fuel residues and the removal of combustion products occurs. An oxidizer (usually oxygen) diffuses to this area by an oncoming flow. In the combustion zone there is a chemical equilibrium between the fuel and the oxidizer, and the concentrations of fuel vapor and oxygen decrease sharply. This is due to an intense oxidation reaction, which leads to a high ambient temperature of the mixture, liquid fuel droplets quickly warm up due to the thermal radiation of the flare core and convective heat exchange with the gas-air medium. The initial temperature of the drop is usually around 120-140 °C, while the environment has a temperature of 300 to 500 °C. When the surface of the drop reaches the evaporation temperature of the lowest boiling fractions of liquid fuel, their evaporation begins. This is due to the effect of heat from the environment, as well as radiation and convection from the core of the torch. The evaporation of the droplet leads to the formation of a combustible vapor-air mixture that can support burning.

An important aspect when burning liquid fuel is the spraying of droplets. In order to achieve uniform distribution and fine-dispersed state of droplets in the hot air flow, special nozzles are used. This allows for more efficient mixing of fuel with the oxidizer and the creation of optimal conditions for burning.

In general, the combustion of liquid fuel occurs by its evaporation, mixing with an

oxidizer (air) and subsequent combustion of the resulting combustible mixture. The atomization of fuel and the creation of conditions for its effective mixing with the oxidizer are important aspects in the organization of the process of burning liquid fuel. of liquid fuel occurs by its evaporation, mixing with an oxidizer (air) and subsequent combustion of the resulting combustible mixture. The atomization of fuel and the creation of conditions for its effective mixing with the oxidizer are important aspects in the organization of the process of burning liquid fuel.

1.3 Математическая модель горения жидких топлив, впрыскиваемых в камеру сгорания при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса

Математическая модель горения жидких топлив, впрыскиваемых в камеру сгорания при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса, является сложной системой уравнений, которая описывает физические процессы, происходящие внутри камеры сгорания. Эта модель учитывает взаимодействие между жидким топливом, воздухом, теплом и химическими реакциями, происходящими в процессе горения.

В основе модели лежат следующие уравнения:

Уравнение сохранения массы: Это уравнение описывает баланс массы внутри камеры сгорания, учитывая впрыскивание жидкого топлива и распределение воздуха. Оно учитывает распределение массовых потоков и изменение концентрации компонентов топлива и воздуха в пространстве.

Уравнение сохранения энергии: Это уравнение описывает баланс энергии внутри камеры сгорания. Оно учитывает теплообмен между горячими газами, стенками камеры и впрыском топлива. Уравнение включает конвективный и кондуктивный теплообмен, а также учет химической реакции горения и выделение тепла.

Уравнение сохранения импульса: Это уравнение описывает баланс импульса в системе, учитывая движение газов внутри камеры сгорания, впрыск топлива и его взаимодействие с воздухом. Уравнение учитывает силы давления, трения и инерции, влияющие на движение газов.

Уравнение химической кинетики: Это уравнение описывает скорость химических реакций горения топлива. Оно учитывает взаимодействие между компонентами топлива и воздухом, образование и потребление промежуточных и конечных продуктов реакции. Уравнение определяет скорость горения топлива и температурные условия в камере сгорания.

метод конечных объёмов. Эти методы позволяют дискретизировать пространство и время, разбивая их на конечные элементы или объёмы. Затем уравнения модели переформулируются в дискретной форме и решаются численно. При моделировании горения жидких топлив при высоких давлениях и числах Рейнольдса также учитываются особенности процесса впрыска топлива, такие как

разбрызгивание, испарение и смешение с воздухом. Для этого могут использоваться дополнительные уравнения и модели, такие как уравнения испарения топлива и модели распределения размеров капель. Моделирование горения жидких топлив при высоких давлениях и числах Рейнольдса является сложной задачей, требующей вычислительных ресурсов и тщательного подбора параметров модели. Однако такие модели позволяют предсказывать поведение системы, оптимизировать процессы горения и разрабатывать более эффективные и экологически чистые системы сгорания жидкого топлива.

Важно отметить, что разработка и применение математических моделей горения жидких топлив является активной областью исследований, и новые модели и методы постоянно разрабатываются для улучшения предсказательной способности и эффективности моделирования процессов горения.

Одной из распространенных математических моделей горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса является модель "единого стадия" (Single-Step Model). Эта модель основана на предположении о том, что горение происходит в одной стадии, то есть топливо полностью окисляется в однородной реакционной зоне.

Модель "единого стадия" использует ряд уравнений для описания горения жидкого топлива. Основные уравнения включают уравнение сохранения массы, уравнение сохранения энергии и уравнение химического равновесия. Эти уравнения учитывают диффузию массы, теплопроводность, конвекцию и химические реакции, происходящие во время горения.

Для численного решения модели "единого стадия" применяются методы конечных элементов, конечных объемов или конечных разностей. Эти методы позволяют аппроксимировать уравнения модели на сетке и численно решать их для получения распределения температуры, концентраций и других параметров в камере сгорания.

Особенности горения при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса, такие как турбулентность, взаимодействие между каплями топлива и движущимся газом, и учет неидеальных условий впрыска, также могут быть учтены в модели с помощью соответствующих подмоделей и параметров. Математические модели горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса имеют важное практическое применение в различных областях, включая авиацию, энергетику и промышленность. Они позволяют оптимизировать процессы сгорания, улучшать эффективность и безопасность систем, а также разрабатывать новые технологии и материалы для устойчивого и экологически чистого горения жидких топлив.

Кроме модели "единого стадия", существуют и другие математические модели, которые учитывают горение жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса. Одной из них является модель "многостадийного горения" (Multistage Combustion Model). Модель "многостадийного горения" предполагает, что горение топлива происходит в нескольких последовательных стадиях, учитывая различные химические реакции и физические процессы. Это позволяет более точно описать сложности, возникающие при горении жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса.

В модели "многостадийного горения" уравнения сохранения массы, энергии и химического равновесия дополняются уравнениями, описывающими конкретные стадии горения, такие как испарение топлива, образование пленки, горение в пленке и диффузионное горение в газовой фазе. Каждая стадия имеет свои параметры, такие как скорость испарения, коэффициенты теплоотдачи и скорость реакции, которые зависят от условий горения. Численное решение модели "многостадийного горения" также выполняется с помощью методов конечных элементов, конечных объемов или конечных разностей. Однако в этом случае требуется более сложная сетка и учет большего числа переменных, что делает модель более вычислительно интенсивной. Выбор конкретной модели зависит от конкретной задачи и доступных данных. Важно учитывать особенности горения жидкого топлива, связанные с высокими давлениями и высокими числами Рейнольдса, такие как турбулентность, взаимодействие с газовой фазой и эффекты впрыска, для достижения точных результатов моделирования.

Математические модели горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса являются важным инструментом в исследованиях и разработках в области сжигания топлива. Они помогают понять и оптимизировать процессы горения, оптимизировать процессы горения, улучшить эффективность сгорания и снизить выбросы вредных веществ. Эти модели могут быть использованы при разработке и улучшении систем сжигания, таких как двигатели внутреннего сгорания, горелки для промышленных печей и котлов, а также системы утилизации отходов.

Моделирование горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса позволяет определить оптимальные параметры процесса, такие как время впрыска топлива, распределение топлива в пространстве, скорость смешения с воздухом и другие факторы, влияющие на эффективность и безопасность сгорания. Кроме того, математические модели позволяют проводить виртуальные эксперименты и оптимизировать процессы горения без необходимости проведения физических испытаний, что экономит время и ресурсы. Однако следует отметить, что точность математических моделей зависит от качества входных данных, таких как физические свойства топлива, химические реакции, параметры сгорания и граничные условия. Поэтому для достижения точных результатов моделирования необходимо проводить эксперименты и измерения, а также учитывать особенности конкретной системы сжигания.

В целом, математические модели горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса являются мощным инструментом для исследований и разработок в области сжигания топлива. Они позволяют более глубоко понять процессы горения, оптимизировать системы сжигания и повысить их эффективность и экологическую безопасность.

В математических моделях горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса учитывается ряд физических и химических процессов, которые происходят во время сгорания. Эти модели обычно основаны на уравнениях сохранения массы, импульса, энергии и массовых долей компонентов, а также на кинетических уравнениях реакций горения. Одним из основных аспектов моделирования горения жидких топлив является учет фазовых переходов, таких как испарение и разложение топлива. Уравнения, описывающие эти процессы,

учитывают тепловой обмен, массообмен и диффузию в паровой и газовой фазах. Модели также учитывают перемешивание топлива с окружающим воздухом и формирование горючей смеси. Для описания химических реакций горения применяются кинетические модели. Они описывают скорости реакций в зависимости от концентраций компонентов и температуры. Кинетические модели могут быть основаны на экспериментальных данных или теоретических предположениях. Моделирование горения жидких топлив также требует учета турбулентности в системе. При высоких числах Рейнольдса турбулентные потоки оказывают существенное влияние на процессы перемешивания и теплообмена. Для моделирования турбулентных потоков часто применяются уравнения Рейнольдса-авеража, которые описывают статистические свойства турбулентных полей. Все эти аспекты моделирования горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса требуют сложных вычислительных алгоритмов и численных методов. Моделирование может проводиться с использованием программных пакетов, специализированных для расчетов горения и сжигания топлива.

Математические модели горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса позволяют исследовать и оптимизировать различные аспекты сжигания жидких топлив в условиях высокого давления и числа Рейнольдса. Они помогают оптимизировать конструкцию и работу системы сгорания, а также предсказывать характеристики процесса, такие как распределение температуры, концентрации компонентов и скорости реакций.

Математические модели позволяют исследовать влияние различных параметров, таких как распределение топлива, давление, скорость воздушного потока и характеристики форсунок на эффективность и стабильность горения. Они также позволяют оптимизировать параметры системы, например, выбрать оптимальные параметры форсунок, рассчитать оптимальные соотношения смеси топлива и воздуха, и определить оптимальные режимы работы системы. Математические модели горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса имеют широкий спектр применений, включая аэрокосмическую и авиационную промышленность, энергетику, судостроение и другие области, где применяются системы сгорания жидких топлив. Они позволяют проводить виртуальные эксперименты, исследовать различные сценарии и условия, что экономит время и ресурсы по сравнению с реальными испытаниями. Моделирование горения жидких топлив также позволяет более глубоко понять физические процессы, происходящие в системе, и оптимизировать ее производительность и эффективность.

В итоге, математические модели горения жидких топлив при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса играют важную роль в разработке и совершенствовании систем сгорания. Они позволяют улучшить эффективность, снизить выбросы и повысить стабильность процесса горения, что имеет большое значение с точки зрения экономической и экологической эффективности систем сжигания жидких топлив.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ О ГОРЕНИИ ВПРЫСКА ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Математическая модель задачи о распыле и горении впрыска жидкого топлива включает в себя уравнение неразрывности для компоненты m , уравнения импульса, энергии, состояния, k - ε модели турбулентности, изменения массы частицы, движения частиц вдоль ее траектории. Запишем эти уравнения для нашей задачи:

Уравнение неразрывности для компоненты m :

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot \left[\rho D \vec{\nabla} \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho}_m^c + \dot{\rho}^s \delta_{m1},$$

где ρ - плотность смеси, ρ_m - парциальная плотность m -й компоненты, $\vec{u} = (u, v, w)$ - компоненты скоростей газа, D - коэффициент диффузии, $\dot{\rho}_m^c$ - химический источниковый член, $\dot{\rho}^s$ - источниковый член вследствие впрыска, δ_{m1} - символ Кронекера для m_1 -й компоненты.

Уравнение импульса:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{u}) = - \vec{\nabla} p - A_0 \vec{\nabla} \left(\frac{2}{3} \rho k \right) + \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} + F^s + \rho g,$$

где A_0 - коэффициент перемежаемости, ($A_0 = 0$ для ламинарных моделей, $A_0 = 1$ для турбулентных моделей), k - кинетическая энергия турбулентности, σ - тензор вязких напряжений.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u I) = - p \vec{\nabla} \cdot \vec{u} + (1 - A_0) \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \vec{\nabla} J + A_0 \rho \varepsilon + \dot{Q} + \dot{Q}^s,$$

$$J = -K \vec{\nabla} T - \rho D \sum_m h_m \vec{\nabla} \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right),$$

где тепловой поток J - удельная внутренняя энергия, ε - диссипация энергии турбулентности, \dot{Q}^c - источниковый член вследствие химических реакций, \dot{Q}^s - источниковый член вследствие взаимодействия с впрыском.

Уравнения k - ε модели для турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε имеют вид:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u k) = - \frac{2}{3} \rho k \vec{\nabla} \cdot \vec{u} + \sigma \cdot \vec{\nabla} u + \vec{\nabla} \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_k} \right) \vec{\nabla} k \right] - \rho \varepsilon + W^k,$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \varepsilon) = - (c_{\varepsilon 1} - c_{\varepsilon 2}) \rho \varepsilon \vec{\nabla} \cdot \vec{u} + \vec{\nabla} \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \vec{\nabla} \varepsilon \right] + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left[c_{\varepsilon 1} \frac{\sigma}{\rho \varepsilon} - c_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon}{\rho \varepsilon} + c_{\varepsilon 3} W^s \right].$$

Уравнение состояния для смеси газов можно записать так:

$$p = R_0 T \sum_m (\rho_m / W_m)$$

Выражение для удельной внутренней энергии выглядит следующим образом:

$$I(T) = \sum_m (\rho_m / \rho) I_m(T)$$

Выражение для удельной теплоемкости при постоянном давлении имеет вид:

$$c_p(T) = \sum_m (\rho_m / \rho) c_{pm}(T)$$

Выражение для энтальпии:

$$h_m(T) = I_m(T) + R_0 T / W_m,$$

где R_0 – универсальная газовая постоянная, W_m – молярная масса компоненты m . Величины $h_m(T)$ и $c_{pm}(T)$ взяты из справочной литературы.

Закон сохранения концентрации компоненты m имеет вид:

$$\frac{\partial (\rho c_m)}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho c_m u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \cdot D_{c_m} \frac{\partial c_m}{\partial x_i} \right) + S_m.$$

Химические реакции, происходящие в камере сгорания, в общем виде записываются следующим образом:

$$\sum_m a_{mr} \chi_m \equiv \sum_m b_{mr} \chi_m,$$

где χ_m – это один моль компоненты m , a_{mr} и b_{mr} представляют собой суммарные стехиометрические коэффициенты для реакции r .

Стехиометрические коэффициенты в соответствии с законом сохранения массы в химических реакциях должны удовлетворять следующему равенству:

$$\sum_m (a_{mr} - b_{mr}) W_m = 0.$$

Скорость химической реакции r обозначается через ω_r и имеет вид

$$\omega_r = k_{fr} \prod_m (\rho_m / W_m)^{a'_{mr}} - k_{br} \prod_m (\rho_m / W_m)^{b'_{mr}}.$$

Порядки обратной реакции a'_{mr} и b'_{mr} не равны порядкам прямой реакции a_{mr} и b_{mr} и определяются эмпирически.

Коэффициенты k_{fr} и k_{br} записываются следующим образом:

$$k_{fr} = A_{fr} T^{\zeta_{fr}} \exp \left\{ - E_{fr} / T \right\}, \quad k_{br} = A_{br} T^{\zeta_{br}} \exp \left\{ - E_{br} / T \right\},$$

где E_{br} – энергия активации прямой реакции, E_{fr} – энергия активации обратной реакции.

Коэффициенты в обратных реакциях определяются из уравнения:

$$\prod_m (\rho_m / W_m)^{b_{mr} - a_{mr}} = K_c^r(T)$$

Здесь $K_c^r(T)$ – константа равновесия, имеющая вид:

$$K_c^r = \exp \left\{ A_r \ln T + B_r / T + C_r + D_r T + E_r T^2 \right\}, \quad \text{где } T = T / 1000 \text{ К.}$$

Скорости химических реакций ω_r входят в источниковый член в уравнении неразрывности:

$$\rho_m^c = W_m \sum_r (b_{mr} - a_{mr}) \omega_r,$$

а количество тепла, выделяющееся в системе за счет химической реакции,

учитывается в уравнении энергии:

$$\dot{Q} = \sum_r \dot{Q}_r \omega_r$$

Здесь \dot{Q}_r - тепловой эффект реакции горения:

$$\dot{Q}_r = \sum_m (a_{mr} - b_{mr})(\Delta h_f^0)_m,$$

где $(\Delta h_f^0)_m$ - теплота образования компоненты m .

Коэффициенты переноса имеют вид:

$$\mu = (1.0 - A_0)\rho v_0 + \mu_{air} + A_0 c_\mu k^2 / \varepsilon,$$

$$\lambda = A_3 \mu, \quad K = \frac{\mu c_p}{P_r}, \quad D = \frac{\mu}{\rho S_c}$$

где v_0 - кинематическая вязкость при нормальных условиях, $c_\mu = 0,09$ - эмпирическая константа.

Для учета зависимости динамической вязкости от температуры использовалась формула Сазерленда:

$$\mu_{air} = \frac{AT^{3/2}}{T + A_2},$$

здесь A_1 и A_2 - экспериментальные константы.

Константа A_3 для турбулентных течений равна $(-2/3)$.

2.1 Модель испарения, горения и столкновения капель

Решение задачи об испарении жидких капель и взаимодействии их с газовой фазой - чрезвычайно сложная проблема. Для того чтобы вычислить массу, момент импульса и теплообмен между испаряющейся каплей и газом, нужно принять во внимание распределение капель по размерам, по скоростям и температуре. Во многих течениях при расчете распыленных жидкостей необходимо учитывать колебания капель, искажения и разрывы. Для расчета двигателей внутреннего сгорания также очень важен учет столкновений капель между собой и их объединения в более крупные капли.

Математическая модель, которая способна объяснить эти сложные физические процессы, сводится к формулировке уравнения испарения. Из этого уравнения находится распределение функции плотности вероятности f , которая имеет десять независимых переменных дополнительно ко времени: три позиции капли по x , три компоненты скорости v , радиус r , температура T_d (принята одинаковой в пределах капли), отклонение от сферы y и изменение со временем отклонения:

$$dy/dt = y.$$

Безразмерная величина y пропорциональна перемещению поверхности капли из своей позиции равновесия на радиус капли r . Физический смысл функции капель

$f(x, v, r, T_d, y, y, t)dvdrdT_d dydy$ - вероятное число капль в единице объема с координатой x и временем t , скоростями в интервале $(v, v + dv)$, радиусами в интервале $(r, r + dr)$, температурами в интервале $(T_d, T_d + dT_d)$, и параметрами смещения в интервалах $(y, y + dy)$ и $(y, y + dy)$. Элемент жидкого объема θ , определяется как:

$$\theta = \int f 4 / 3\pi r^3 dvdrdT_d dydy.$$

Макроскопическая плотность жидкой фазы ρ_l' , определена как:

$$\rho_l' = \rho_d \theta,$$

где ρ_d - микроскопическая плотность жидкой фазы, которая может, тем не менее, быть сравнимой с газовой плотностью, потому что отношение ρ_d к ρ велико. Величина ρ_d принята постоянной.

Изменение со временем функции f может быть получено путем решения уравнения испарения жидкой капли:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla_x (fv) + \nabla_v (fF) + \frac{\partial}{\partial r} (fR) + \frac{\partial}{\partial T_d} (fT_d) + \frac{\partial}{\partial y} (fy) + \frac{\partial}{\partial y} (fy) = j_{coll} + j_{bu}$$

В уравнении (50) величины F, R, T_d , и y изменяются со временем, исходя из особенностей капли, ее скорости, радиуса, температуры, и скорости колебаний y .

Величины j_{coll}, j_{bu} - источники, обусловленные столкновением и разрывом капель.

Источник столкновения j_{coll} может быть записан как:

$$j_{coll} = \frac{1}{2} \int \int f(x, v_1, r_1, T_{d1}, y_1, y_1, t) f(x, v_2, r_2, T_{d2}, y_2, y_2, t) \pi (r_1 + r_2)^2 |v_1 - v_2| \times \\ \times (\sigma(v, r, T_d, y, y, v_1, r_1, T_{d1}, y_1, y_1, v_2, r_2, T_{d2}, y_2, y_2) - \\ - \delta(v - v_1) \delta(r - r_1) \delta(T_d - T_{d1}) \delta(y - y_1) \delta(y - y_1)) - \\ - \delta(v - v_2) \delta(r - r_2) \delta(T_d - T_{d2}) \delta(y - y_2) \delta(y - y_2) \times \\ \times dv_1 dr_1 dT_{d1} dy_1 dy_1 dv_2 dr_2 dT_{d2} dy_2 dy_2.$$

Здесь функция плотности вероятности столкновения σ определена как: $\sigma dvdrdT_d dydy$ - вероятное число капель со свойствами в заданных интервалах, которые следуют из столкновения между каплями с заданными свойствами. Возможны два типа столкновений:

- если под воздействием столкновения параметр b уменьшается по сравнению с критической оценкой b_{cr} , то капли сливаются;
- если b превышает b_{cr} , то капли сохраняют свой размер и температуру, но их скорости подвергаются изменению.

Критический параметр воздействия b_{cr} определен как:

$$b_{cr}^2 = (r_1 + r_2)^2 \min(1.0, 2.4 f(y) / W_{eL}).$$

Здесь $f(y) = y^3 - 2.4y^2 + 2.7y$,

$$y = r_2 / r_1,$$

$$W_e = \rho_d |v_1 - v_2| r_1 / a(\bar{T}_d),$$

где $r_1 \leq r_2$,

$$\bar{T}_d = \frac{r_1^3 T_1 + r_2^3 T_2}{r_1^3 + r_2^3}.$$

Величина a – коэффициент поверхностного натяжения, который изменяется в пределах от значения a_0 при начальной температуре T_0 и до нуля при критической температуре T_{cr} . Выражение для функции плотности вероятности столкновения σ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma = & \frac{b_{cr}^2}{(r_1 + r_2)^2} \delta \left[r - (r_1^3 + r_2^3)^{1/3} \right] \delta \left[v - \frac{r_1^3 v_1 + r_2^3 v_2}{r_1^3 + r_2^3} \right] \delta \left[T_d - \frac{r_1^3 T_1 + r_2^3 T_2}{r_1^3 + r_2^3} \right] \times \\ & \times \delta(y - y_2) \delta(y - y_2) + \frac{2}{(r_1 + r_2)^2} \times \\ & \times \int_{b_{cr}}^{r_1+r_2} \delta(r - r_1) \delta(v - v_1') \delta(T_d - T_{d1}) \delta(y - y_1) \delta(y - y_1) + \\ & + \delta(r - r_2) \delta(v - v_2') \delta(T_d - T_{d2}) \delta(y - y_2) \delta(y - y_2) b db, \end{aligned}$$

где для v_1' и v_2' имеем:

$$v_1' = \frac{r_1^3 v_1 + r_2^3 v_2 + r_2^3 (v_1 + v_2) \frac{b - b_{cr}}{r_1 + r_2 - b}}{r_1^3 + r_2^3}, \quad v_2' = \frac{r_1^3 v_1 + r_2^3 v_2 + r_1^3 (v_1 + v_2) \frac{b - b_{cr}}{r_1 + r_2 - b}}{r_1^3 + r_2^3},$$

(57)

Источниковый член, обусловленный разрывом капель f_{bu} , выражается следующим образом:

$$f_{bu} = \int f(x, v, r, T, y, t) y B(v, r, T, y, v, r, T, y, x, t) dv dr dT dy$$

(58)

Распад носит вероятностный характер, определяется функцией распределения B , определенная как $BdvdrdTdydy$ – это число капель в интервале, в котором происходит распад капель. Пусть после распада радиус капли подчиняется распределению:

$$g(r) = \frac{1}{\bar{r}} e^{-r/\bar{r}}.$$

Саутеровский средний радиус r_{32} – средний объёмно поверхностный радиус капель определяется формулой:

$$r_{32} = 3\bar{r} = \frac{r_1}{\Gamma \rho r^3} \left(- + \frac{d-1}{8 a(T_{d1})} y_1^2 \right).$$

Скорость получившейся капли также отличается от скорости материнской капли, скоростью s величиной ω и с направлением, распространяющимся

произвольно в плоскости нормали относительно вектора скорости между материнской каплей и газом. Найдем величину ω :

$$w = 1/2r_1 y_1.$$

Выражение для B имеет вид:

$$B = g(r) \delta(T - T_d) \delta(y) \delta(y) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \delta[v - (v + \omega \cdot n)] \cdot dn,$$

Определим функции, которые определяют траекторию движения каждой капли. В выражение для ускорения капли F вносят вклад, аэродинамическое сопротивление и сила тяжести [125-128]:

$$F = \frac{3}{8} \frac{\rho_d}{\rho_d} \frac{|u + u' - v|}{r} (u + u' - v) C_D + g.$$

Здесь C_D - коэффициент лобового сопротивления определяется как:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} (1 + 1/6 Re_d^{2/3}), & Re_d < 1000 \\ 0.424, & Re_d > 1000, \end{cases}$$

$$Re_d = \frac{2\rho |u + u' - v|}{\mu_{air}(T)} \cdot T = \frac{T + 2T_d}{3}.$$

где

Турбулентная скорость газа u' добавлена к средней скорости газа при вычислении сопротивления каплей и степени испарения. Предполагается, что каждый компонент u' взят из Гауссовского распределения со средним квадратным отклонением $(2/3)k$. Таким образом, принимается:

$$G(\vec{u}') = (4/3\pi k)^{-3/2} \exp\left\{-3|\vec{u}'|^2/4k\right\}$$

Значение величины u' выбирается один раз при каждом времени турбулентной корреляции t_{turb} , в противном случае остается постоянным. Время корреляции капли можно найти из соотношения:

$$t_{turb} = \min\left(\frac{\kappa}{\varepsilon}, c_{ps} \frac{\kappa^{3/2}}{\varepsilon} \frac{1}{|u + u' - v|}\right),$$

где $c_{ps} = 0,16432$ – эмпирическая константа, t_{turb} – минимальным время разрыва капли. Степень изменения радиуса капли R определяется соотношением:

$$R = -\frac{(\rho D)_{air}(T) Y_1^* - Y_1}{2\rho_d r (1 - Y_1^*)} Sh_d,$$

где Sh_d – число Шервуда для переноса массы, Y_1^* – массовая доля паров топлива на поверхности капли, $Y_1 = \rho_1/\rho$, $(\rho D)_{air}(T)$ – коэффициент диффузии паров топлива в воздухе. Число Шервуда определяется как:

$$Sh_d = (2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc_d^{1/2}) \frac{\ln(1 + B_d)}{B_d},$$

$$Sc_d = \frac{\mu_{air}(T)}{\rho D_{air}(T)} \quad \text{и} \quad B_d = \frac{Y_1^* - Y_1}{1 - Y_1^*}.$$

где

Поверхностная массовая доля Y_1^* может быть получена из выражения:

$$Y_{1d}^*(T) = \frac{W_1}{W_1 + W_0 \left(\frac{P}{p_0(T_d)} - 1 \right)},$$

где W_0 – локальная средняя молярная масса для всех разновидностей паров топлива, а $p_0(T_d)$ – равновесное давление паров топлива при температуре T_d . Температура капли является однородной, а парциальное давление паров топлива на поверхности капельки равняется равновесному давлению пара. Для диффузии пара в воздухе используется эмпирическое соотношение: $(\rho D)_{air}(T) = D_1 T^{D_2}$, где D_1 и D_2 – константы. Изменение температуры капли обусловлено уравнением баланса энергии [110, 120]:

$$\rho_d \frac{4}{3} \pi r^3 c_l T - \rho_d 4\pi r^2 RL(T_d) = 4\pi r^2 Q_d,$$

где c_l – удельная теплоемкость жидкости, $L(T_d)$ – удельная теплота парообразования, и Q_d – теплопроводность на поверхности капли в единичном объеме. Уравнение (70) означает, что энергия, подводимая к капле, нагревает ее, вследствие чего происходит испарение. Теплопроводность Q_d можно определить из следующего соотношения:

$$Q_d = \frac{K_{air}(T)(T - T_d)}{2r} Nu_d,$$

в котором:

$$Nu_d = (2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr_d^{1/2}) \frac{\ln(1 + B_d)}{B_d} \quad \text{– число Нуссельта,}$$

$$Pr_d = \frac{\mu_{air}(T) c_p(T)}{K_{air}(T)} \quad \text{– число Прандтля,}$$

$$K_{air}(T) = \frac{K_1 T^{3/2}}{T + K_2},$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении и при температуре $T = (T + 2T_d)/3$, K_1 и K_2 – константы.

Уравнение для ускорения и для параметров изменения капли имеет следующий вид:

$$y = \frac{2}{3} \frac{\rho}{\rho_d} \frac{(u + u' - v)^2}{r^2} - \frac{8a(T_d)}{\rho_d r^3} y - \frac{5\mu(T_d)}{\rho_d r^2} y,$$

где $\mu(T_d)$ – вязкость жидкости. Уравнение (72) – это уравнение затухающих гармонических колебаний, в котором внешняя сила обеспечивается газовыми аэродинамическими силами капли, возвратная сила обеспечивается поверхностными силами напряженности, а затухание происходит за счет вязкости жидкости.

Функции: p^s, F^s, Q^s, W^s получены суммированием коэффициентов изменения: массы, скорости движения и энергии всех капель, находящихся в положении \mathbf{x} в момент времени t . Тогда имеем:

$$\rho^s = - \int f \rho_a 4\pi r^2 R dv dr dT_a dy dy,$$

$$F^s = - \int f \rho_a \left\{ \frac{4}{3\pi r^3} F' + 4\pi r^2 R v \right\} dv dr dT_a dy dy,$$

$$Q^s = - \int f \rho_a \left\{ 4\pi r^2 R \left[I(T) + \frac{1}{2} (v-u) \right] + \frac{4}{3\pi r^3} \left[c T + F(v-u) \right] \right\} dv dr dT_a dy dy, \quad (73)$$

$$W^s = \int f \rho_a \left\{ \frac{4}{3\pi r^3} F' + 4\pi r^2 R v \right\} dv dr dT_a dy dy,$$

$$F' = F - g.$$

где

Здесь ρ^s, F^s, Q^s - скорости изменения массы, импульса и энергии всех капель, имеющих радиус - вектор \vec{x} в момент времени t . W^s - скорость, при которой турбулентные вихри совершают работу по распространению впрыскиваемых капель.

Для расчета колебаний и дробления капель нам требуется два дополнительных уравнения для y_p и y_p . Величина y_p пропорциональна смещению поверхности капель из состояния равновесия, градуированному радиусом капли. Капля распадается, тогда и только тогда, если y_p превышает единицу.

Для обновлений значений y_p и y_p каждого вычислительного цикла используем уравнение:

$$y(t) = \frac{We}{12} + \exp(-t/t_d) \left[\left(y(0) - \frac{We}{12} \right) \cos \omega t + \frac{1}{\omega} \left(y(0) + \frac{y_0 - 12}{t_d} \right) \sin \omega t \right],$$

$$We = \frac{\rho u^2 r}{\alpha}$$

в котором: α - число Вебера, u - относительная скорость между каплей

и газом, $\alpha = \frac{2 \rho r^2}{5 \mu_l t_d}$ - время вязкого затухания, μ_l - вязкость жидкости и

$\omega^2 = 8 \frac{\alpha}{\rho_d r^3} - \frac{1}{t_d^2}$ - квадрат частоты колебаний.

запишем начальные и граничные условия задачи о горении жидких топлив в камере сгорания. в начальный момент времени газ находится в состоянии покоя и начальное распределение температуры постоянно:

$$t=0: u=0; v=0; w=0; T=T_0.$$

На стенках для поля скорости задается турбулентный закон стенки, тангенциальная компонента скоростей которого определяется логарифмическим профилем:

$$\frac{v}{u^*} = \begin{cases} \frac{1}{k} \ln \left(c \frac{\zeta}{l \omega} \zeta^{7/8} \right) & \zeta > R_c, \\ \zeta^{1/2} & \zeta < R_c, \end{cases}$$

$$\zeta = \frac{\rho u v}{\mu_{air}(T)}$$

где ζ - число Рейнольдса, определенное по скорости газа

относительно стенки: $v = \left| \vec{u} - \omega_{wall} \vec{k} \right|$ на расстоянии y от стенки, u^* - динамическая скорость, которая соотносится с тангенциальными компонентами напряжения стенки следующим образом:

$$\vec{\sigma}_\omega - (\vec{\sigma}_\omega \cdot \vec{n})\vec{n} = \rho \left(u^* \right)^2 \frac{\vec{v}}{v},$$

где $\vec{v} = \vec{u} - \omega_{wall} \vec{k}$, $k = \sqrt{c_\mu^2 (c_{\varepsilon_2} - c_{\varepsilon_1}) \text{Pr}_\varepsilon}$, $B = R_c^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{k} \ln \left(\frac{c}{l \omega} R_c^{\frac{7}{8}} \right)$.

Температура на стенке задается фиксированной и для нее используется условие турбулентного закона стенки:

$$\rho u^* c_p \left(T - T_\omega \right) = \begin{cases} 1 / \left(\text{Pr} \frac{v}{l u^*} \right), & \zeta \leq R_c, \\ 1 / \left\{ \text{Pr} \left[\frac{v}{u^*} + \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr} - 1} \right) R_c^{1/2} \right] \right\}, & \zeta > R_c, \end{cases}$$

здесь Pr_l - число Прандтля для ламинарного потока. Граничные условия для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε имеют вид:

$$\nabla k \cdot \vec{n} = 0, \quad \varepsilon = c_\mu \frac{k^2}{l}, \quad c_\mu = \left[\frac{c_\mu}{\text{Pr}_\varepsilon (c_{\varepsilon_2} - c_{\varepsilon_1})} \right]^{1/2}$$

На выходе для поля скорости \vec{u} граничное условие можно записать так:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial x} = 0$$

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ВПРЫСКА ЖИДКОГО ГЕПТАНА С УЧЕТОМ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

Целью данного исследования является создание математической модели процесса горения жидкого топлива (гептана) в камере сгорания, оснащенной инжектором для впрыска топлива, с учетом теплового излучения. Особое внимание уделяется исследованию распыления топлива перед его испарением и смешиванием, так как это играет важную роль в обеспечении эффективного сгорания и хороших характеристик выбросов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, включающих выбор метода моделирования, разработку математической модели процесса горения, проведение численного моделирования с учетом теплового излучения и анализ полученных результатов.

В данной работе горение рассматривается как процесс взаимодействия жидкого топлива с кислородом, сопровождающийся выделением тепла и света в виде пламени. Этот процесс происходит в различных устройствах, таких как печи и

двигатели, и может приводить к образованию побочных продуктов, включая воду и углекислый газ.

Математическая модель, разрабатываемая в данном исследовании, позволяет описать процесс горения жидкого топлива в цилиндрической камере сгорания с высокой точностью, учитывая тепловое излучение. Это позволяет получить более полное представление о распределении температур и давлений в камере сгорания во время горения.

Для моделирования процесса горения с учетом теплового излучения применяются численные методы, которые позволяют провести виртуальные эксперименты и получить детальную информацию о характеристиках процесса. Результаты моделирования анализируются и интерпретируются, что помогает лучше понять физические процессы, происходящие в системе сгорания жидкого топлива.

Таким образом, моделирование процесса горения жидкого топлива с учетом теплового излучения с использованием численных методов является важным инструментом для исследования и оптимизации систем сгорания жидкого топлива. Это позволяет улучшить эффективность горения, снизить выбросы вредных веществ и повысить безопасность работы устройств, в которых используется горение жидкого топлива. В процессе моделирования учитывается высокое давление и высокие числа Рейнольдса, которые характерны для камер сгорания. Выбор соответствующих численных методов позволяет учесть сложные физические явления, такие как турбулентность потока топлива, взаимодействие топлива с окружающим воздухом, испарение и смешение компонентов с высокой точностью.

Математическая модель, основанная на численных методах, учитывает также тепловое излучение, которое является важным фактором в процессе горения жидкого топлива. Тепловое излучение оказывает значительное влияние на распределение температур и давлений в камере сгорания, поэтому его учет позволяет получить более точные результаты моделирования.

Исследование процесса горения жидкого топлива с учетом теплового излучения позволяет определить оптимальные параметры системы, такие как время горения, распределение тепловых нагрузок, эффективность сгорания и выбросы вредных веществ. Это важно для разработки новых технологий сгорания, улучшения существующих систем и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Таким образом, моделирование процесса горения жидкого топлива с учетом теплового излучения с помощью численных методов является важным инструментом для научных исследований, разработки и оптимизации систем сгорания и повышения их эффективности и безопасности.

Математическая модель горения жидкого топлива в цилиндрической камере сгорания с высоким давлением и высоким числом Рейнольдса требует учета различных факторов, включая тепловое излучение. Для достижения этой цели используются численные методы, которые позволяют моделировать процесс горения и определять его характеристики.

Одной из ключевых задач в моделировании горения является учет теплового излучения. Тепловое излучение возникает в результате выделения энергии в виде электромагнитных волн при горении или нагреве материалов. Для этого используются специальные модели, которые позволяют оценить количество и

распределение теплового излучения в камере сгорания.

Одной из таких моделей является модель теплового излучения Симпсона-Кларка. Она основана на формулах, разработанных Симпсоном и Кларком в 1947 году. В этой модели учитываются различные параметры, такие как температура, эмиссивность, длина волны и коэффициент поглощения, чтобы определить количество теплового излучения. Закон Стефана-Больцмана используется для определения выходной мощности излучения, зависящей от температуры и коэффициента излучения. Модель Симпсона-Кларка может быть применена для расчета теплового излучения в газовых и пылевых потоках.

Еще одной моделью, используемой для учета теплового излучения, является модель Шустера-Шмидта-Бриллоуэна. Она основана на законе Бриллоуэна, который учитывает длину волны, температуру и коэффициент поглощения для определения излучения. Модель Шустера-Шмидта-Бриллоуэна может применяться для расчета эмиссии излучения в определенном диапазоне длин волн и используется при анализе излучения в газовых потоках, пылевых потоках и горящих топливах. Также существует модель теплового излучения диффузной плоскости,

Уравнение P1 имеет следующий вид:

$$S_r = \frac{4}{3} \sigma_a T^4 - \frac{4}{3} \sigma \epsilon T^4 + \nabla \cdot \left(\frac{1}{3} \sigma_t \nabla T^4 \right)$$

Первый член уравнения объясняет, как концентрация меняется со временем из-за конвекции. Второй член описывает изменение концентрации в пространстве, также связанное с конвекцией. Третий член отражает диффузионный перенос примеси, а четвертый член отвечает за источники или стоки примеси, такие как химические реакции или внешние источники загрязнения. Модель P1 широко применяется в различных областях, включая аэродинамику, химическую промышленность, биотехнологию, океанографию и другие. Она обладает главным преимуществом — точным описанием распределения концентрации примеси в пространстве и времени, что особенно важно для моделирования технологических процессов, связанных с перемещением вещества в потоках газов или жидкостей.

В данной работе мы будем использовать модель P1 теплового излучения, так как она является самой простой и понятной для новичков в данной области. Эта модель применяется для описания распространения излучения в трехмерном пространстве и основана на уравнениях переноса излучения, которые описывают изменение интенсивности излучения в пространстве и времени.

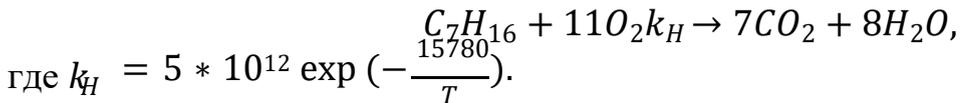
3.1 Физические и химические свойства гептана

Гептан, химическая формула C_7H_{16} , является основным эталонным топливом для определения октанового числа бензина и служит заменителем n-алканов в тяжелых топливах. Он обладает следующими физическими и химическими свойствами: гептан - бесцветная жидкость, которая легко испаряется и нерастворима в воде. Он является одним из компонентов бензина и обладает подвижностью, а также характерным запахом, напоминающим нефть. Его пары тяжелее воздуха и могут образовывать взрывоопасные смеси.

Н-гептан, или гептан в нормальных условиях, также является бесцветной

жидкостью с резким запахом. При атмосферном давлении 1 атмосфера и температуре 20 °С его плотность составляет 683,8 кг/м³. Н-гептан имеет температуру плавления -90,61 °С, температуру кипения 98,42 °С, температуру воспламенения 223 °С и температуру вспышки -4 °С. Критическая температура н-гептана равна 267,01 °С, а критическое давление составляет 2,74 МПа. Взрывоопасная концентрация газовой смеси н-гептана с воздухом находится в диапазоне от 1,06% до 6,7% по объему. Удельная теплота сгорания н-гептана составляет 45,105 МДж/кг, а его молярная масса равна 100,21 г/моль.

Формула реакции горения гептана с образованием воды углекислого газа:



Эта реакция представляет собой глобальное преобразование н-гептана и кислорода в воду, H_2O , и двуокись углерода, углекислого газа.

3.2 Программа Sim Flow 4.0

SimFlow 4.0 - это программное обеспечение, разработанное для Computational Fluid Dynamics (CFD) и предназначенное для использования в инженерных и научных целях. Это мощный инструмент, который включает все необходимые функции CFD и может быть использован на операционных системах Windows и Linux. SimFlow использует библиотеки с открытым исходным кодом OpenFOAM® и обладает интуитивно понятным пользовательским интерфейсом.

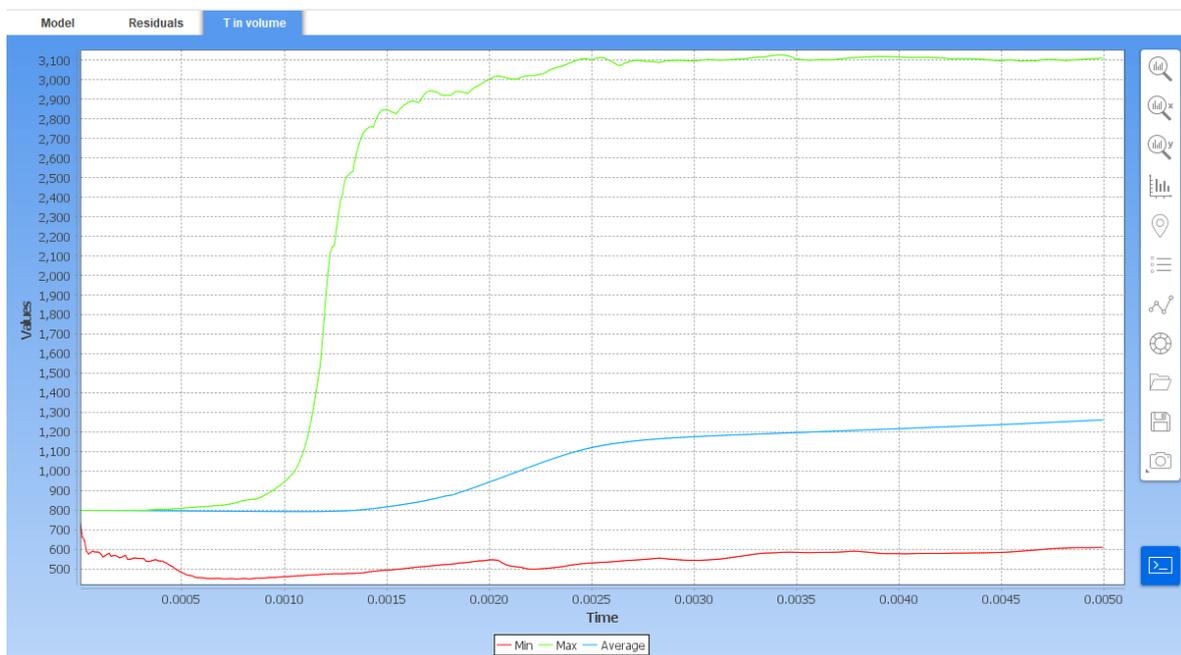
С помощью SimFlow можно моделировать различные физические явления, включая химические реакции, многофазные потоки, теплообмен, турбулентные потоки, кавитацию и потоки сжимаемых и несжимаемых жидкостей. Программа также предоставляет возможность применять современные модели турбулентности и численные методы.

Результаты моделирования, полученные с помощью SimFlow, могут быть использованы для оптимизации конструкции до ее физической реализации и для предоставления входных данных для анализа напряжений. SimFlow является полезным инструментом для инженеров и исследователей, позволяющим проводить детальные и точные расчеты и анализы потоков жидкости и газа.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе исследуется тепловое излучение в камере сгорания во время горения гептана с использованием модели P1 (см. рисунок 1). Камера сгорания имеет форму цилиндра с радиусом 8 см и высотой 2 см. В нижней части камеры расположен инжектор, через который впрыскивается 0,1 мг жидкого топлива. Температура в камере сгорания поддерживается на уровне 800 К.

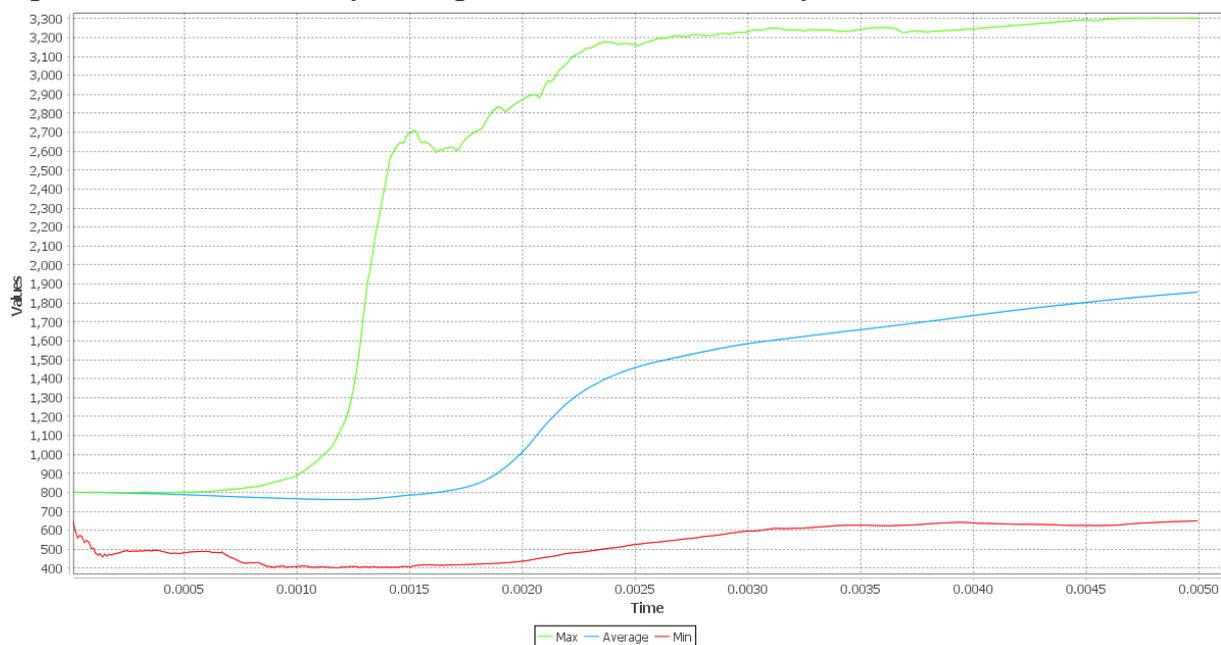
Задача заключается в изучении характеристик теплового излучения и его влияния на процесс горения гептана в данной камере.



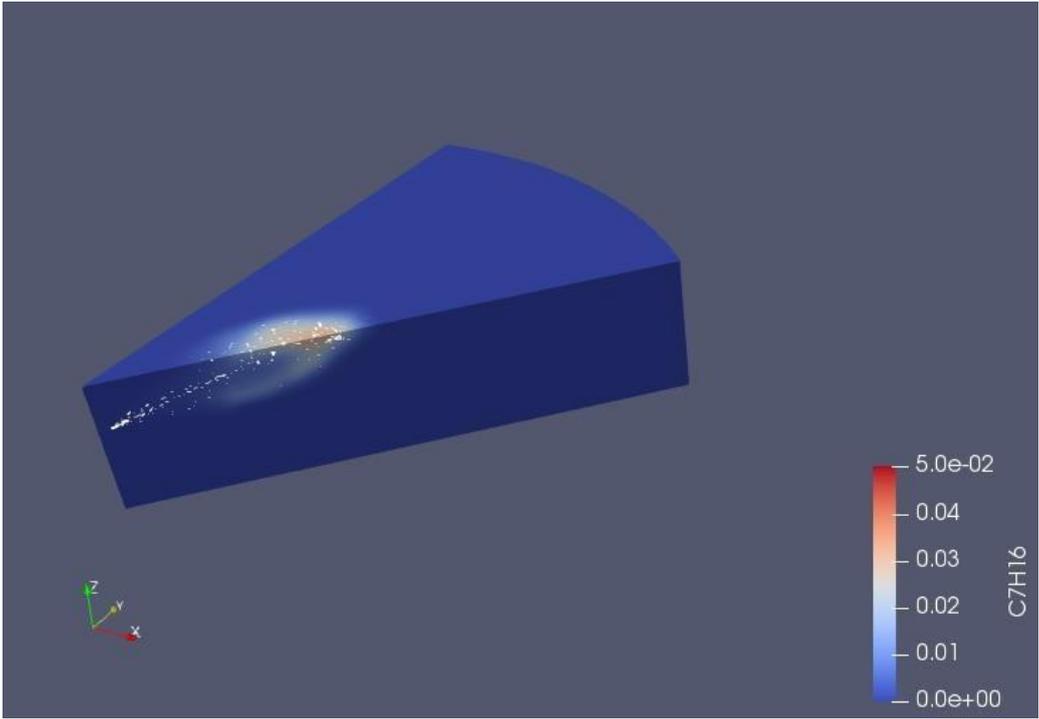
Наблюдение за температурой в камере сгорания.

В этом рисунке можно следить за максимальной и минимальной температурой камере сгорания. Внезапное повышение температуры является результатом процесса горения.

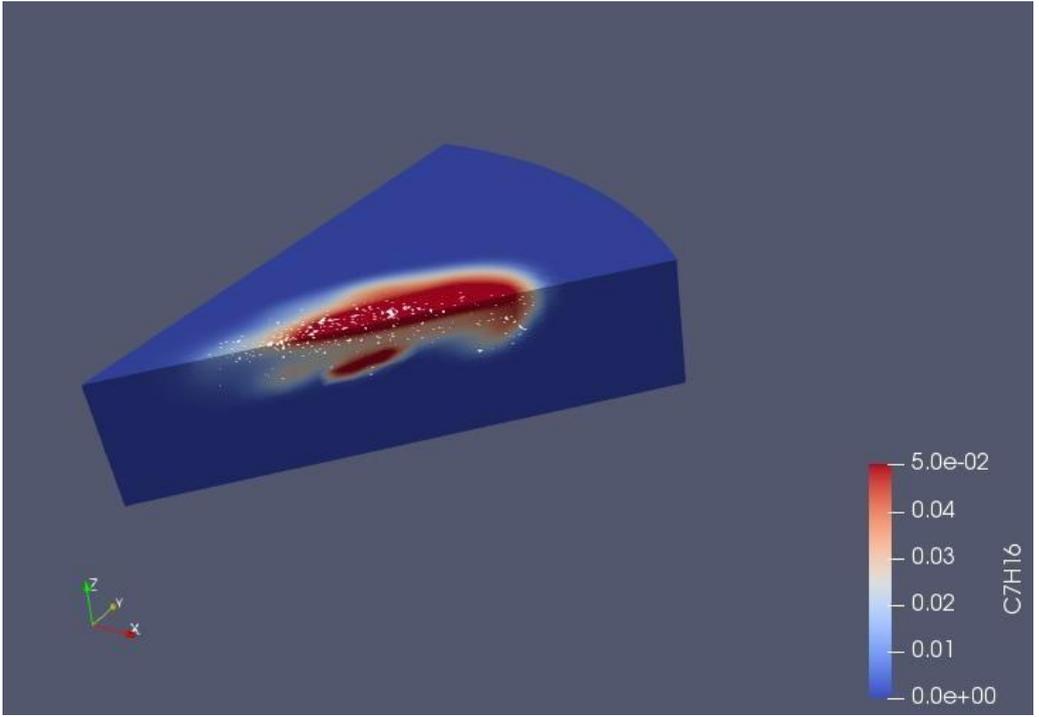
Мы запустили второй расчет чтобы изучить влияние теплового излучения на горение гептана и получили расчет с моделью излучение



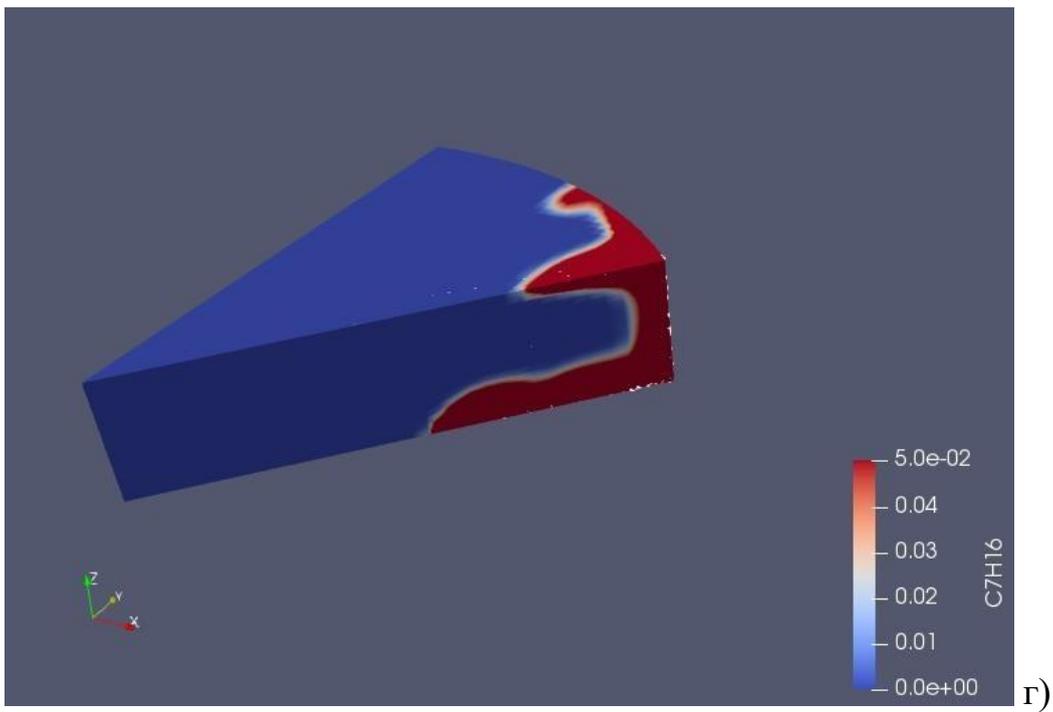
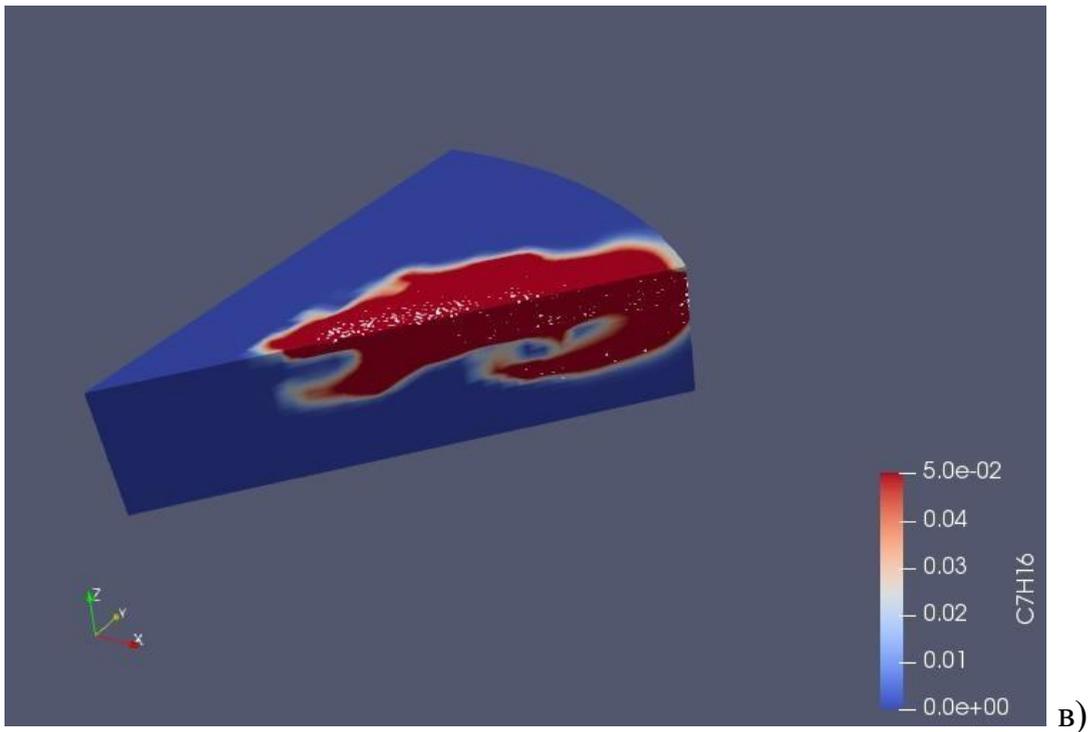
Наблюдение за температурой в камере сгорания с учетом излучение P1.



a)

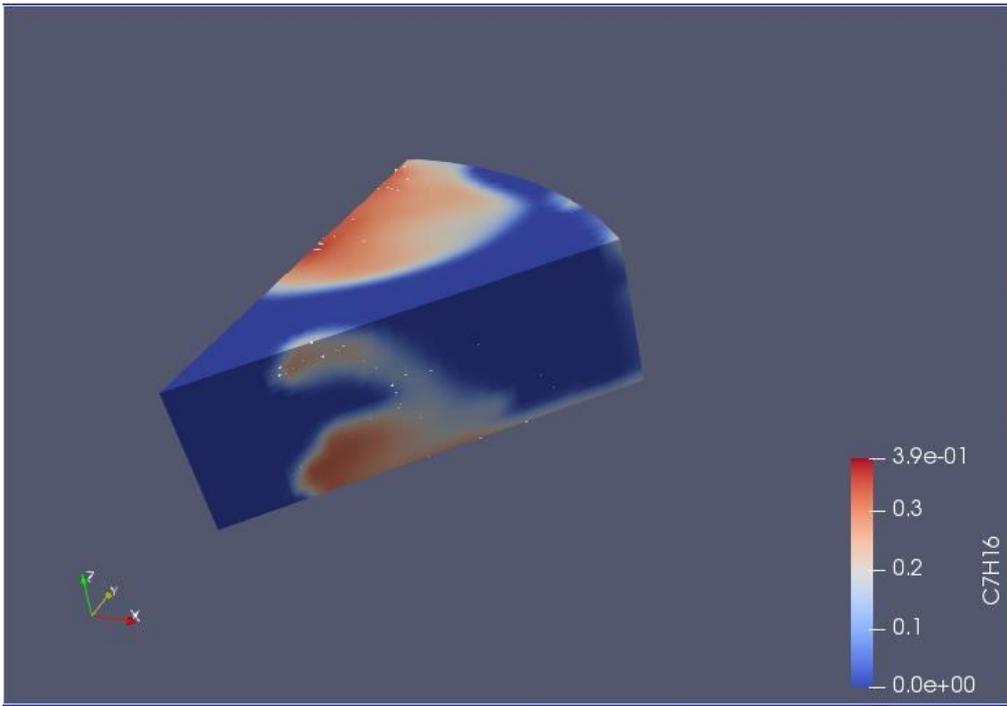


b)

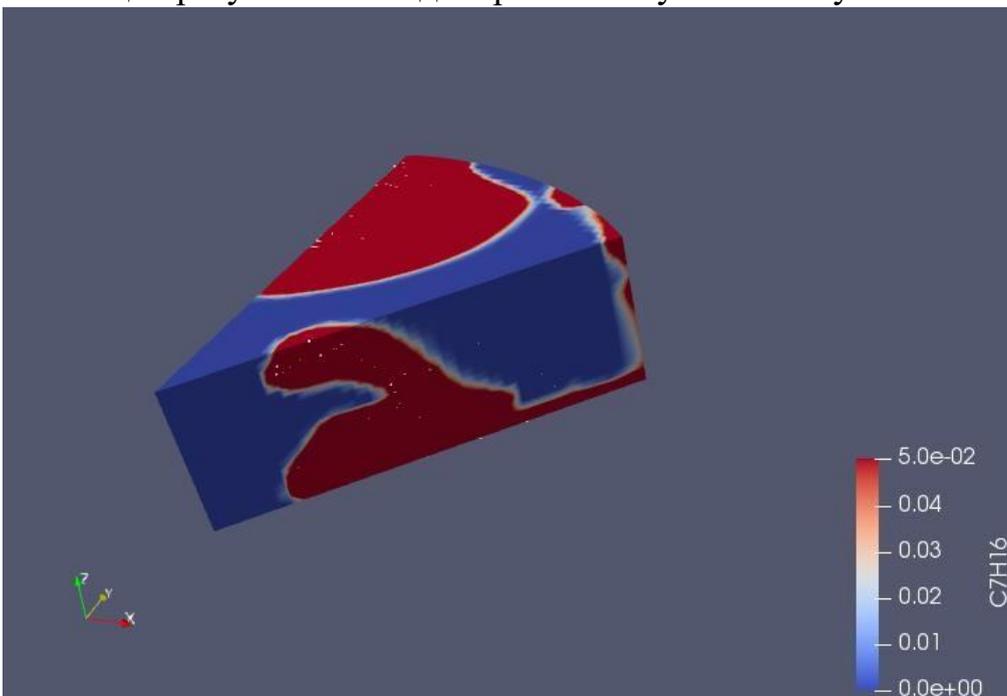


а), б), в), г) Движение частиц впрыска гептана без излучением.

Здесь можно видеть результата анализа движение частиц гептана внутри камеры сгорания .



Анимация результатов моделирования с учетом излучение P1.



Движение частиц впрыска гептана с излучением P1.

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является оценка перспективности моделирования систем обмена данными между устройствами АСУ ТП высокоавтоматизированных подстанций с точки зрения экономической эффективности и перспективности, а также ресурсоэффективности и

конкурентоспособности проекта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать конкурентные технические решения проекта; провести SWOT-анализ для выявления сильных и слабых сторон; выполнить планирование и организацию научного исследования, на их основе построить диаграмму Гантта, а также определить бюджет и ресурсоэффективность научного проекта.

Потенциальными потребителями результатов работы могут быть эксплуатирующие организации.

5.1 ПРЕДПРОЕКТНЫЙ АНАЛИЗ

5.1.1 ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОТРЕБИТЕЛИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время существует несколько решений по обеспечению моделирования систем обмена данными между устройствами АСУ высокоавтоматизированных подстанций, предлагаемые такими компаниями, как Siemens (Германия), «Элеси» (Россия). Они предоставляют разработку АСУ ТП (автоматизация систем управления технологическим процессом), на основе которой производится вся модель по которой будет происходить обмен данными между устройствами АСУ ТП. Такой способ обмена позволяет повысить надежность, быстродействие всей системы, что ведет к снижению замены или ремонта оборудования.

Потребность в разработке технического задания (ТЗ) на проектирование такой модели актуальна для энергетических компаний, которые эксплуатируют электрооборудование подстанции (ПС).

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка.

Сегментирование – разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей.

Проведем сегментирование энергетических компаний, заинтересованных в разработке ТЗ для модели обмена данными устройств АСУ ТП по следующим критериям: размер компании – доля электрооборудования, которую можно цифровизировать (таблица 5).

Таблица 5 – Карта сегментирования энергетических компаний, заинтересованных в разработке ТЗ для модели обмена данными устройств АСУ ТП

		Доля электрооборудования, которую можно цифровизировать, %		
		25	50	75
Размер энергетической компании	Крупные	**	***	***
	Средние	*	**	**
	Мелкие	*	*	**

* - низкая степень заинтересованности

** - средняя степень заинтересованности

*** - высокая степень заинтересованности

В результате анализа карты сегментирования можно сделать вывод, что полученное в ходе выполнения данной работы ТЗ для модели обмена данными между устройствами АСУ ТП будет интересно крупным и средним энергетическим компаниям, в которых доля электрооборудования, которую можно цифровизировать, составляет 50-75%.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В данном разделе проводится анализ технического решения, который позволит в наибольшей степени определить характеристики, описывающие качество разработки, а также перспективы её развития

В рамках данной работы произведем сравнение относительно молодой и перспективной технологии “Высокоавтоматизированная подстанция” с уже существующей, так называемой, традиционной подстанцией.

Оценка исследования проводится по следующим группам критериев:

1. Технические критерии оценки качества разработки:

- Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей);
- Функциональная мощность – количество защит, предоставляемых шкафом;
- Надёжность – заключается в быстровременном отключении короткого замыкания и резервирование специальными защитами, для сохранения оборудования;
- Электромагнитная совместимость вторичного оборудования – стабильная и безотказная работа оборудования на ПС при условии требований ЭМС.
- Качество интеллектуального интерфейса – наличие пульта управления на лицевой панели и его простота

2. Экономические критерии оценки эффективности разработки:

- стоимость вторичного оборудования;
- затраты на кабельные сооружения и кабельную продукцию;
- затраты на проектирование;

стоимость модернизации терминалов ПС;

Оценочная карта, представленная в таблице 6, позволяет вносить коррективы в научное исследование, так как предусматривает его определенные технические и экономические особенности разработки, создания и коммерциализации. В силу отсутствия идентичных предлагаемому решению разработок невозможно провести его сравнение с другими. В связи

этим, максимальный балл характеризует полное выполнение того или иного показателя. Технические критерии определяются согласно требованиям предъявляемых к разработке данной программы. Экономические критерии

определены согласно финансовым возможностям, а также актуальностью истадией готовности технического решения.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum V_i \cdot B_i$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Высокоавтоматизированная ПС	Трад.ПС	Высокоавтоматизированная ПС	Трад.ПС
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки качества разработки					
1. Удобство в эксплуатации	0,15	5	4	0,75	0,6
2. Надежность работы	0,2	5	4	1	0,8
3. Функциональность (спектр возможностей)	0,2	5	4	1	0,8
4. Электромагнитная совместимость	0,1	5	3	0,5	0,3

вторичного оборудования					
5. Качество интеллектуального интерфейса	0,15	5	3	0,75	0,6
Экономические критерии оценки эффективности разработки					
1. Стоимость вторичного оборудования	0,09	3	5	0,27	0,45
2. Затраты на кабельные сооружения и кабельную продукцию	0,04	5	3	0,2	0,12
3. Затраты на проектирование	0,04	5	3	0,2	0,12
4. Стоимость модернизации терминалов ПС	0,03	5	4	0,15	0,12
Итого	1				3,91

По результатам расчетов, представленных в таблице 6, можно сделать вывод, что по техническим и экономическим критериям технологии “Высокоавтоматизированных подстанций” предпочтительней традиционных.

5.2 Swot-АНАЛИЗ

SWOT-анализ проводится для анализа внутренних и внешних факторов, способных повлиять на научно-исследовательский проект. Его матрица позволяет определить взаимное влияние факторов и сделать выводы, которые помогут при разработке стратегии проведения научного исследования. К сильным и слабым сторонам можно отнести внутренние черты научного исследования, а к возможностям и угрозам – характеристики внешней среды. В результате анализа составляется матрица, представленная в виде таблицы 11.

Таблица 11 – Матрица SWOT анализа научно-исследовательского проекта

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Инновационные решения; С2. Уменьшение затрат времени и накладки с контролем защит; С3. Большой срок службы; С4. Высокая чувствительность к аварийным режимам; С5. Минимальный уровень шума и вред окружающей среде.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Слабая нормативно-техническая база; Сл2. Усложнение проекта в связи с реализацией на базе стандарта МЭК 61850; Сл3. Требуется опыт работы и знание по эксплуатации оборудования; Сл4. Требуется отдельные цепи постоянного тока для подключение измерительных трансформаторов.</p>
<p>Возможности: В1. Внедрение новых технологий на массовое производство; В2. Применение энергопредприятиями устройств, как основную защиту главных схем электростанций; В3. Реализация необслуживаемой подстанции в обозримом будущем; В4. Возможность защиты и замены более дорогостоящего оборудования; В5. Повышение спроса.</p>	<p>Преимущественно своим характеристикам, устройства могут устанавливаются на большое количество электрооборудования, благодаря этому будет возможность закупить большое количество устройств за меньшую стоимость; Долгий срок службы позволит увеличить спрос, обеспечивая тем самым экономию на покупке новых.</p>	<p>Из-за новых технологий и стандарта возможны проблемы с установкой и обеспечением передачи данных в реальном времени; Для сохранности энергооборудования потребуется время для обучения персонала пользования оборудованием и его программными комплексами.</p>

<p>Угрозы:</p> <p>У1. Проблема с синхронизацией приема данных;</p> <p>У2. Возможная, дополнительная государственная сертификация оборудования;</p> <p>У3. Экономическая ситуация в стране, способствующая закрытию предприятий по производству устройств;</p> <p>У4. Отсутствие финансирования на получение новых технологий.</p>	<p>Удовлетворение желаний потребителя может привести к дополнительной государственной сертификации, по которой устройство может получить дополнительные средства на совершенствование старых технологий;</p> <p>Обладая долгим сроком службы и высокой чувствительностью к авариям, устройство затмевает аналогичные оборудования конкурентов.</p>	<p>Использование оборудования приведёт к снижению спроса, и обеспечит конкурентам разработку зарубежных программ более высокого и современного класса;</p> <p>Фирма является зарубежной компанией и возможно увеличение цены в связи с экономической обстановкой.</p>
--	--	---

По итогам SWOT-анализа были определены сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы для исполнения. После проведения анализа всех этих сторон было выявлено, что проект имеет довольно хорошие перспективы для реализации и его сильные качества могут нивелировать недостатки.

5.2.1 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 12.

Таблица 12 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел.	5	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела.	5	4
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке.	5	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок.	5	3
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав.	5	5
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности.	3	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта.	5	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки.	5	4

9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок.	5	5
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки.	5	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок.	4	3
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот.	3	2
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки.	3	2
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки.	5	4
15	Проработан механизм реализации научного проекта.	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	68	54

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю составляем оценку по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. При оценке степени проработанности научного проекта: 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта.

Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

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

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

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

B_i – балл по i – му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Перспективность данной разработки можно считать выше среднего, так как $B_{\text{сум}}$ получилось от 68 до 54.

5.2.2 Инициация проекта

Инициация проекта определяет изначальные цели и содержание, внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав научного проекта магистерской работы содержит следующую структуру, представленную в подразделах ниже.

5.2.3 Цели и результаты проекта

Информация о заинтересованных сторонах проекта представлена в таблице 13.

Таблица 13 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Руководитель	Реализация проекта, карьерный рост и финансирование новых проектов
Инженер	Реализация проекта, карьерный рост

Информация о иерархии целей проекта и критериях их достижения представлена в таблице 14.

Таблица 14 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Изучение влияния теплового излучения на процесс горения жидкого топлива в камере сгорания.
Ожидаемые результаты проекта:	1. Автоматизация процесса обработки и передачи данных; 2. Повышение надежности и безаварийности;
Критерии приемки результата проекта:	Результатом проекта является формирование технического задания на моделирование системы обмена данными между устройствами АСУ ТП высокоавтоматизированных подстанций.

5.2.4. Организационная структура проекта

Данные о составе рабочей группы, ролях, функциях и трудозатратах каждого участника данного проекта представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, кал.дн.
1	Кулешова Елена Олеговна, НИ ТПУ, к.ф-м.н., доцент ОЭЭ	Руководитель	Контроль за исполнением проекта, проверка правильности формирования технического задания, помощь в подготовке к защите проекта	32
2	Шылгаубаева Ляззат Бакыткызы ТПУ, студент	Инженер	Исполнение проекта: формирование технического задания на моделирование систем обмена данными между устройствами	88

5.3 Планирование научно-исследовательских работ

5.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

В рамках планирования проведения научного исследования формируется конкретный перечень этапов, на которые делится всё исследование, их последовательность, содержание выполнения запланированной работы, по каждому виду которой закрепляется конкретный исполнитель.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой входит руководитель и инженер. В таблице 17 представлен результат поэтапного планирования работ, с закреплением исполнителя.

Таблица 17 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического решения	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направлений исследований	Руководитель Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Анализ исходных данных	Инженер
	6	Анализ эксплуатационной документации ПО микропроцессорных устройств	
	7	Разработка экранных форм и присвоение динамики к оборудованию	
	8	Разработка логических схем и настройки РЗА	
	9	Расчет уставок защит	
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
Разработка технической	11	Исследование логических схем микропроцессорных устройств	Инженер

документации и проектирование	12	Выбор и расчёт конструкции	Руководитель Инженер
	13	Технико-экономические расчеты	Инженер
Оформление отчета по НИР	14	Составление пояснительной записки	Инженер

5.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Количественная оценка затрат является неотъемлемой частью анализа исследования с экономической точки зрения и позволяет определить его эффективность в данном аспекте. Как правило, большую часть бюджета научно-исследовательского проекта составляют затраты на заработную плату. В связи с этим определение трудоёмкости работ каждого участника становится первостепенной задачей при расчёте экономических показателей исследования. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож}$, в человеко-днях, используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{\min\ i} + 2t_{\max\ i}}{5},$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , с учётом параллельности выполнения работ несколькими исполнителями, что позволит провести обоснованный расчет заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Данная работа выполнялась индивидуально поэтому $T_{pi} = t_{ожi}$. Ожидаемая длительность каждой из работ приведена в таблице 18.

Для правильного планирования работ составляется диаграмма Гантта – это ленточный график, на котором отображается необходимая информация по планированию научного исследования: даты начала и окончания выполнения работ, их временная протяженность и исполнитель. Для удобства построения необходимо длительность каждого этапа работ перевести в календарные дни, для чего применяется формула:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Формула коэффициента календарности:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Округлим до целого числа количество календарных дней по каждой работе T_i к и сведем рассчитанные значения в одну таблицу (таблица 18).

В качестве примера расчета рассмотрим руководителя (6 дневная рабочая неделя) – составление и утверждение технического задания:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3t_{\text{min}} + 2t_{\text{max}}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \approx 2 \text{ чел. -дн};$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i} = \frac{2}{1} = 2 \text{ дня};$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22;$$

$$T_{\text{к}} = T_{\text{р}} \cdot k_{\text{кал}} = 2 \cdot 1,22 = 2,44 \approx 3 \text{ дня}.$$

Инженер (6 дневная рабочая неделя) – подбор и изучение материалов:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3t_{\text{min}} + 2t_{\text{max}}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \approx 2 \text{ чел. -дн};$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i} = \frac{2}{1} = 2 \text{ дня};$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 66} = 1,22;$$

$$T_{\text{к}} = T_{\text{р}} \cdot k_{\text{кал}} = 2 \cdot 1,22 = 2,44 \approx 3 \text{ дня}.$$

Таблица 18– Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях $T_{\text{ки}}$	
	t_{min} чел-дни		t_{max} чел-дни		$t_{\text{ож}i}$ чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	2	0	4	0	3	0	3	0	4	0

Подбор и изучение материалов по теме	0	5	0	7	0	6	0	6	0	7
Выбор направления исследования	0	2	0	3	0	3	0	3	0	4
Календарное планирование работ по теме	1	0	2	0	2	0	2	0	2	0
Анализ исходных данных	0	4	0	9	0	6	0	6	0	7
Предварительный выбор защит РЗ	0	4	0	7	0	5	0	5	0	6
Расчет параметров РЗ	0	3	0	8	0	5	0	5	0	6
Планирование аварийных режимов	0	6	0	9	0	7	0	7	0	9
Расчет уставок защит	0	10	0	15	0	12	0	12	0	15
Оценка эффективности полученных результатов	2	0	6	0	3	0	3	0	4	0
Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	8	0	10	0	9	0	9	0	11	0
Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	0	5	0	9	0	7	0	7	0	9
Выбор и расчет конструкции	0	7	0	9	0	8	0	8	0	10
Технико-экономические расчеты	0	3	0	6	0	4	0	4	0	5
Составление пояснительной записки	0	6	0	11	0	8	0	8	0	10
Итого дней (руководитель)									21	
Итого дней (инженер)									88	
Итого дней (проект)									109	

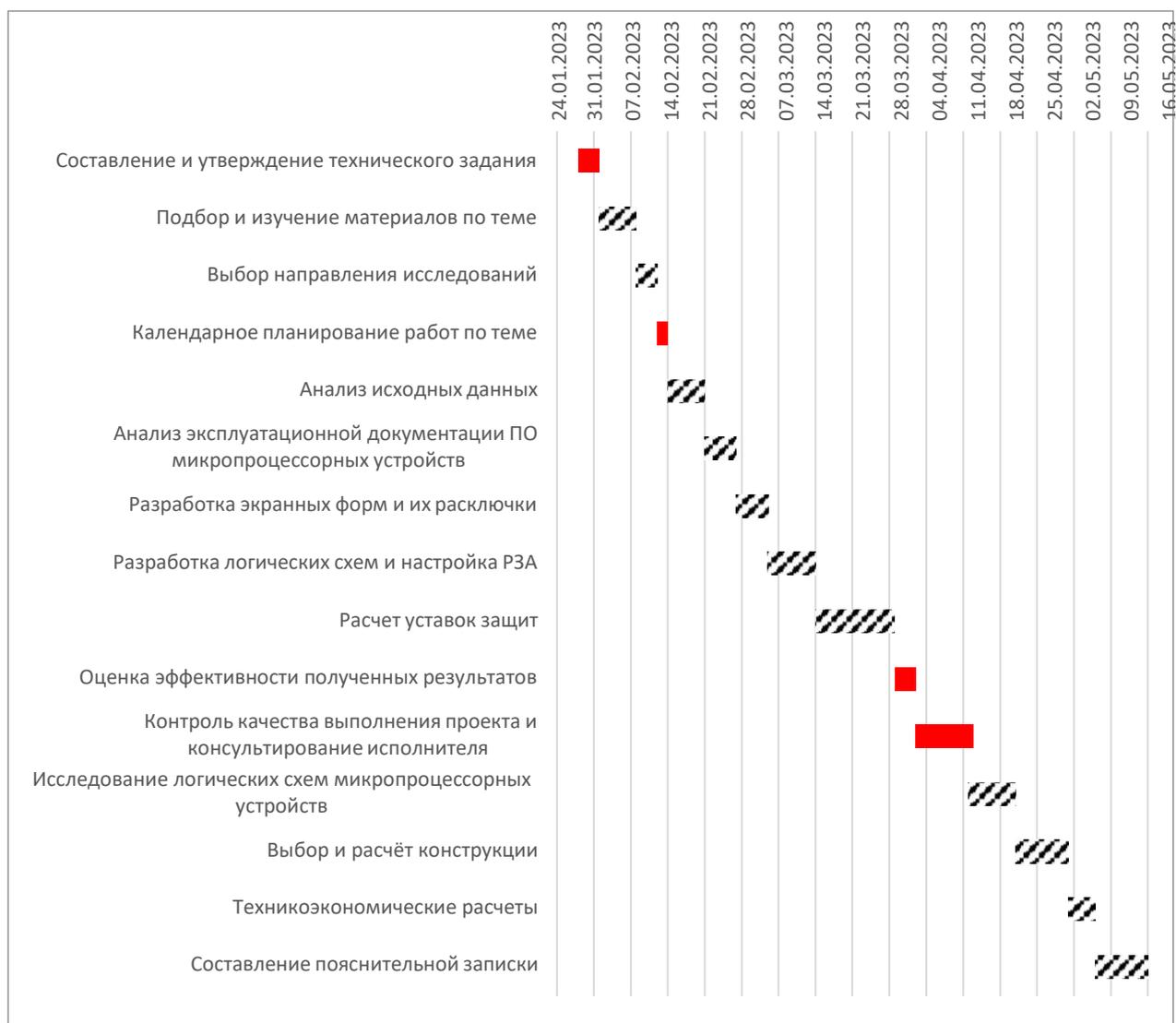


Рисунок 71 – Диаграмма Гантта

////// – Инженер; ■■■■■ – Руководитель;

Таким образом, согласно спланированному графику выполнения исследования, срок выполнения работ по проекту каждого участника составляет: - руководитель – 21 рабочих дней; - инженер – 88 рабочих дней. Суммарный срок выполнения проекта: 19 рабочих дней. Диаграмма Гантта позволяет наглядно отображать последовательность и сроки выполнения каждого этапа ВКР.

5.3.1. Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблицах 19 и 20.

Затраты на специальное оборудование

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по конкретной теме.

Определение стоимости спецоборудования производится по действующим ценам, предоставленным подрядной организацией.

Таблица 20 – Затраты на спецоборудование для выполнения проектной работы

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Затраты на доставку и монтаж (15% от цены)	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Персональный компьютер	1	31 698,00	4 754,70	36 452,70
2	Периферийные устройства	1	8 795,00	1 319,25	10 114,25
3	Лицензия на программное обеспечение MicrosoftOffice	1	5000	750,00	5 750,00
Итого:					52 316,95

Общие затраты на выполнение проектной работы с учетом материальных затрат составили 52316,95 руб.

Основная заработная плата

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, а также рабочих опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется на основе трудоемкости выполняемых работ и действующей системы тарифных ставок и окладов. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада.

Статья включают основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты), а также дополнительную заработную плату:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

Где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Расчет основной заработной платы выполняем по формуле, представленной ниже:

$$Z_{\text{осн}} \square Z_{\text{дн}} \square T_p$$

где, $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.;

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

Расчет среднедневной заработной платы выполняем по формуле:

$$Z_{\text{дн}} \square \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

где, $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 48 раб.дней $M=10$, 4 месяца, 6-дневная неделя);

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени персонала составляет 237 раб.дней для 2022 года и 236 для 2023 года.

Согласно с производственным календарем 2022-2023 года, действующим на территории РФ, для 6-ти дневной рабочей недели и с ТК РФ, составлен баланс рабочего времени рабочей группы проекта, представленный в таблице 21.

Таблица 21 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней -выходные и праздничные дни	66	67
Потери рабочего времени -отпуск	48	48
-невыходы по болезни	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	236

Больничные предоставляются в соответствии с корпоративным порядком организации.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M \square Z_{TC} \square (1 \square k_{пр} \square k_d) \square k_p,$$

где Z_{TC} – заработная плата по тарифной ставке, руб./месяц;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, принимаемый равным 0,3 (т.е. 30% от Z_{TC});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска, как для северного района РФ).

Дополнительная заработная плата есть вознаграждение за труд сверх установленной нормы, за трудовые успехи и за особые условия труда:

$$Z_{доп} \square k_{доп} \square Z_{осн},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, принимаемый 0,12.

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) Оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия.

2) Стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) Иные выплаты; районный коэффициент.

Расчет основной заработной платы произведем на примере руководителя:

Месячный оклад руководителя:

$$Z_M \square 20500 \square (1 \square 0,3 \square 0,4) \square 1,3 \square 45350,00 \text{руб./месяц};$$

Среднедневная заработная плата руководителя:

$$Z_{дн} \square \frac{45305 \square 10,4}{31} \square 1988,07 \quad - \text{ 2022 год}$$

руб./день

$$Z_{\text{дн2}} = \frac{77350}{236} \cdot 10,4 = 1996,49 \text{руб./день} - 2023 \text{ год}$$

Основная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 1988,07 \cdot 38 + 1996,49 \cdot 27 = 129451,89 \text{руб.}$$

Аналогичные расчеты произведем для куратора и инженера. Результаты расчетов заработной платы сведем в таблицу 22.

Таблица 22 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$, руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{д}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб.дн	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	20 500,00	0,3	0,4	1,3	45 305,00	1 988,07	38	129 451,89
						1 996,49	27	
Инженер	10 000,00	0,3	0,2	1,3	19 500,00	855,70	255	305 854,14
						859,32	102	
Итого								435306,3

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков, оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей, выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Таблица 23 – Заработная плата исполнителей проекта

Заработная плата	Руководитель	Инженер	Сумма
Основная зарплата	129 451,89	305 854,14	435306,3
Дополнительная зарплата	15 534,23	36 702,50	52236,73
Итого <i>Ст</i>			487543,03

Таким образом, по результатам расчетов, которые сведены в таблицу 23, была получены сумма полной заработной платы рабочей группы, которая составила 487543,03 рублей.

Отчисления на социальные нужды

В данной статье рассматриваются отчисления во внебюджетные фонды, которые представляют собой обязательные страховые отчисления от затрат на оплату труда работников органам социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования.

Данные отчисления рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{внеб.}} = k_{\text{внеб.}} \cdot Z_{\text{зп}}$$

где: $k_{\text{внеб.}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Данный коэффициент равен 30% на 2023 год и включают в себя:

- 22% на обязательное пенсионное страхование;
- 2,9% социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством (1,8% для иностранных граждан и лиц без гражданства);
- 5,1% на обязательное медицинское страхование.

Выполненные расчеты сведены в таблицу 24.

Таблица 24 – Расчёт отчислений во внебюджетные фонды

Исполнители	$Z_{\text{зп}}$, руб.	$k_{\text{внеб.}}$	$C_{\text{внеб.}}$, руб.	Итого $C_{\text{внеб.}}$, руб.
Руководитель	144 986,12	0,3	43 495,84	146262,83
Инженер	342 556,64	0,3	102 766,99	

Накладные расходы

К накладным расходам рабочей группы относятся все затраты, которые не были учтены в предыдущих статьях расходов. К ним относятся оплата электроэнергии, транспортные и почтовые расходы, услуги печати и сотовой связи и т.п.

Расчет накладных расходов производится по формуле:

$$C_{\text{накл}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \cdot k_{\text{накл}}$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы, равный 0,8.

Суммарные накладные расходы проекта:

$$C_{\text{накл}} = 487543,03 + 0,8 \cdot 390034,424 \text{руб.}$$

Формирование бюджета затрат проекта

В данном разделе будет произведен подсчет итоговых затрат на проведение научного исследования, который является определяющим в формировании бюджета затрат проекта.

Бюджет затрат на научное исследование определяется как сумма затрат по каждой из статей и приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Расчет бюджета затрат на научное исследование

Наименование статьи	Сумма, руб.	Удельный вес, %
1. Специальное оборудование	52 316,95	4,86
2. Затраты по основной заработной плате	435306,3	40,4
3. Затраты по дополнительной заработной плате	52236,73	4,84
4. Отчисления во внебюджетные фонды	146262,83	13,58
5. Накладные расходы	391334,424	36,2
Бюджет затрат проекта	1 077 457	100

Таким образом, на основании данных статей, приведенных в таблице 25 бюджет на разработку технического задания, составляет 1 077 457 рублей из которых самая большая часть расходов (40,4%) идет на выплату основной заработной платы рабочей группе (руководителю и инженеру).

Определение ресурсной эффективности исследования

Расчет ресурсоэффективности осуществляется с помощью интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i ,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта;

b_i – балльная оценка проекта.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 26.

Таблица 26 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки
1. Эффективность	0,25	5
2. Надежность	0,25	5
3. Удобство в эксплуатации	0,25	5
4. Ремонтопригодность	0,125	4
5. Функциональность	0,125	5
Итого	1,00	

Интегральный показатель ресурсоэффективности для разрабатываемого научно-исследовательского проекта:

$$I_{pi} = 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,125 \cdot 4 + 0,125 \cdot 5 = 4,875;$$

Таким образом, интегральный показатель ресурсоэффективности составил 4,875 из 5 возможных, что свидетельствует об эффективности реализации технического проекта.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Социальная ответственность играет важную роль в научных исследованиях, включая исследования влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности. В современном мире все больше признается важность учета социальных и экологических аспектов при проведении научных исследований, в том числе в области аэродинамики.

Социальная ответственность научных исследований подразумевает не только стремление к достижению научных результатов, но и учет и управление возможными влияниями на общество и окружающую среду. В случае исследования влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности, речь идет о более глубоком понимании и минимизации потенциальных негативных последствий этого влияния.

Одной из основных целей исследования является определение влияния шероховатости на аэродинамические характеристики криволинейной поверхности. Это может помочь разработчикам и инженерам создать более эффективные и безопасные системы, основанные на аэродинамических принципах.

Однако, проведение таких исследований должно также учитывать социальные и экологические аспекты. Возможные негативные последствия, такие как загрязнение окружающей среды или возникновение новых проблем безопасности, должны быть идентифицированы и минимизированы. Кроме того, ученые и исследователи должны обеспечить прозрачность и доступность результатов своих исследований для широкой общественности.

Таким образом, социальная ответственность в исследованиях влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности заключается в постоянном стремлении к достижению научных результатов, с учетом потенциальных влияний на общество и окружающую среду. Это позволяет создавать инновационные решения, способствующие устойчивому развитию и обеспечению безопасности воздушной и промышленной техники.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:

Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации исследования влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности являются важными аспектами данной темы. Вот некоторые из них:

Соблюдение нормативных требований: При проведении исследования необходимо учитывать соответствующие нормы и стандарты, определенные законодательством в области безопасности. Важно соблюдать требования по защите труда, пожарной безопасности, экологической безопасности и другие применимые нормы.

Оценка рисков: Перед началом исследования следует провести оценку возможных рисков, связанных с эксплуатацией исследуемой системы. Это включает выявление потенциальных опасностей, оценку вероятности их возникновения и определение мер по управлению рисками.

Разработка безопасных процедур: Необходимо разработать и внедрить безопасные рабочие процедуры для проведения исследования. Это может включать инструкции по правильному использованию оборудования, обучение персонала в области безопасности и установление протоколов действий в случае чрезвычайных ситуаций.

Оборудование и инфраструктура: Для обеспечения безопасности при эксплуатации исследования необходимо обеспечить соответствующее оборудование и инфраструктуру. Это может включать специальные системы вентиляции, пожаротушение, аварийное отключение, а также проверку и обслуживание оборудования согласно установленным требованиям.

Обучение и осведомленность персонала: Персонал, работающий в рабочей зоне исследования, должен быть обучен по вопросам безопасности и должен иметь осведомленность о потенциальных опасностях и процедурах предотвращения несчастных случаев. Регулярное обновление знаний и навыков также является важным.

Мониторинг и анализ: В процессе эксплуатации исследования необходимо осуществлять систематический мониторинг и анализ безопасности.

Продолжая обсуждение правовых и организационных вопросов обеспечения безопасности при эксплуатации исследования влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности, следует уделить внимание следующим аспектам:

Мониторинг и анализ: В процессе эксплуатации исследования необходимо осуществлять систематический мониторинг и анализ безопасности. Это включает регулярные проверки состояния оборудования, контроль рабочей среды, анализ данных и выявление любых отклонений или потенциальных проблем безопасности. Результаты мониторинга и анализа должны использоваться для принятия

соответствующих мер и улучшения системы безопасности.

Система управления безопасностью: Рекомендуется разработать и внедрить систему управления безопасностью, которая будет включать политику безопасности, роли и обязанности персонала, процедуры управления рисками, тренинги и обучение персонала, а также систему обратной связи и улучшений. Это позволит обеспечить непрерывное улучшение безопасности и реагирование на изменения и новые требования.

Соблюдение регулирующих норм и стандартов: Исследование должно быть проведено в соответствии с применимыми регулируемыми нормами и стандартами в области безопасности. Это может включать международные стандарты, национальные законы и правила, а также промышленные стандарты. Соблюдение этих норм и стандартов поможет обеспечить безопасность исследования и защиту интересов всех заинтересованных сторон.

Взаимодействие с заинтересованными сторонами: Важно взаимодействовать с различными заинтересованными сторонами, включая руководство организации, сотрудников, специалистов по безопасности, регулирующие органы и сообщество.

Обеспечение обучения и осведомленности: Все работники, занятые в рабочей зоне исследования, должны быть обучены вопросам безопасности и осведомлены о правилах и процедурах, связанных с эксплуатацией исследуемой системы. Это включает обучение по правилам работы с оборудованием, управлению рисками, процедурам эвакуации и действиям в чрезвычайных ситуациях. Регулярные тренинги и обновление знаний помогут поддерживать высокий уровень безопасности.

Документирование и отчетность: Все аспекты безопасности, связанные с эксплуатацией исследования, должны быть документированы и учетные записи должны быть хранены в соответствии с требованиями. Это включает процедуры, инструкции, проверки, мониторинг, обучение и другую связанную информацию. Регулярная отчетность по вопросам безопасности позволит контролировать соблюдение требований и принимать меры по улучшению безопасности, если это необходимо.

Аудиты и проверки соответствия: Регулярные аудиты и проверки соответствия помогут убедиться, что все меры безопасности соответствуют установленным требованиям и правилам. Это может включать внутренние аудиты, независимые проверки и ревизии со стороны регулирующих органов. Результаты аудитов должны использоваться для внесения улучшений и корректировки системы безопасности, если это необходимо.

Управление чрезвычайными ситуациями: Необходимо разработать и реализовать планы чрезвычайных ситуаций, которые будут определять действия персонала в случае аварий, пожаров или других нештатных ситуаций. Это включает определение ролей и обязанностей, систему оповещения и эвакуации, использование средств пожаротушения и других мер по предотвращению или уменьшению последствий чрезвычайных ситуаций.

Постоянное изучение новых технологий, методов и научных достижений в области безопасности поможет обновлять и совершенствовать систему безопасности при эксплуатации исследования. Регулярные обзоры и анализ инцидентов, а также обратная связь от работников и других заинтересованных сторон, позволят выявлять уязвимые места и предпринимать меры для их устранения. Внедрение современных методов и технологий, таких как автоматизация, удаленное наблюдение и управление, анализ больших данных и искусственный интеллект, может способствовать

повышению эффективности и безопасности процессов.

В целом, эффективное обеспечение безопасности при эксплуатации исследования, связанного с исследованием влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности, требует комплексного подхода, включающего соблюдение норм и стандартов, разработку безопасных процедур, обучение персонала, регулярный мониторинг и анализ, сотрудничество с заинтересованными сторонами, аудиты и проверки соответствия, управление чрезвычайными ситуациями и стремление к непрерывному улучшению безопасности. Это поможет обеспечить безопасную и продуктивную эксплуатацию исследования и минимизировать риски для работников и окружающей среды.

Трудовой кодекс РФ устанавливает права и обязанности работника и работодателя, правила нормирования и оплаты труда, трудоустройство, вопросы охраны труда. Обеспечение прав работников на охрану труда включает права и гарантии на обеспечение условий, соответствующих требованиям. В статье 219 трудового кодекса РФ детализированы права работников, согласно которым у каждого работника должно быть рабочее место, соответствующее правилам охраны труда. Государство гарантирует работникам защиту их права на труд в условиях, соответствующих требованиям охраны труда (ТК РФ Статья 220). Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты, а также оснащения рабочих мест средствами коллективной защиты (ТК РФ Статья 221).

Согласно ГОСТ 12.2.032-78. «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» стол должен соответствовать современным требованиям эргономика и позволять расположить на рабочей поверхности все необходимое оборудование, в зависимости от характера выполняемой работы. Соответствие рабочего места требованиям ГОСТ 12.2.032-78 представлено в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Требования к организации рабочего места

Требование	Требуемое значение	Значение параметров в помещении
Высота рабочей поверхности стола	Регулируемая высота (680-800 мм) Нерегулируемая высота (более 725 мм)	Нерегулируемая высота 750 мм
Рабочий стул (кресло)	Подъемноповоротный, регулируемый по высоте и углу наклона спинки	Не соответствует

Расположение монитора от глаз пользователя	600-700 мм	Соответствует
--	------------	---------------

Для выполнения всех требований нормативных актов по организации рабочего места лаборатории необходимо подать заявку на приобретения рабочего стула с функциями регулировки по высоте и углу наклона спинки для профилактики монотонии и переутомления.

6.2. Производственная безопасность при эксплуатации:

Производственная безопасность при эксплуатации исследования, связанного с исследованием влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности, является важным аспектом, чтобы обеспечить безопасную работу персонала и предотвратить возможные производственные инциденты. Ниже приведены некоторые меры, которые могут быть предприняты для обеспечения производственной безопасности:

Оценка рисков: Проведите тщательную оценку рисков, связанных с эксплуатацией исследования. Идентифицируйте потенциальные опасности, связанные с работой с оборудованием, материалами, инструментами и химическими веществами.

Разработайте процедуры и меры по предотвращению и управлению рисками.

Использование защитного оборудования: Обеспечьте работников необходимыми средствами индивидуальной защиты (СИЗ), такими как защитные очки, перчатки, респираторы и другие, в зависимости от рисков и требований безопасности. Все работники должны быть обучены и должны строго соблюдать правила использования СИЗ.

Обучение и инструктаж: Предоставьте обучение и инструктаж работникам, занятым в эксплуатации исследования. Обучите их правилам безопасной работы, процедурам эксплуатации оборудования, управлению рисками и действиям в чрезвычайных ситуациях. Регулярно проводите повторные обучения и проверки знаний.

Поддержание оборудования в исправном состоянии: Регулярно проверяйте и обслуживайте оборудование, используемое в исследовании, чтобы гарантировать его надлежащую работу и безопасность. В случае обнаружения дефектов или неисправностей, принимайте меры по их исправлению или замене.

Управление химическими веществами: Если в исследовании используются химические вещества, обеспечьте их правильное хранение, маркировку и обращение с ними. Следуйте указаниям производителей и соответствующим правилам безопасности при работе с опасными веществами. Обеспечьте доступ к необходимым средствам для ликвидации утечек и предотвращения загрязнения окружающей среды.

Система управления безопасностью: Разработайте и реализуйте систему управления безопасностью, включающую политику безопасности, стандарты производственной безопасности, процедуры и инструкции. Определите ответственных лиц и создайте механизмы для отслеживания соблюдения правил безопасности и непрерывного улучшения безопасности процессов.

Система отчетности и анализа инцидентов: Установите механизмы отчетности о производственных инцидентах и близких к ним ситуациях. Проводите анализ причин инцидентов и предпринимайте меры по предотвращению их повторения. Регулярно

проводите проверки и аудиты производственной безопасности для выявления слабых мест и внесения соответствующих улучшений.

Сотрудничество с заинтересованными сторонами: Вовлекайте работников, профсоюзы и другие заинтересованные стороны в процессы обеспечения производственной безопасности. Учитывайте их мнения и предложения при разработке и внедрении мер безопасности. Организуйте обмен опытом и передачу знаний в области безопасности.

Непрерывное улучшение: Старайтесь постоянно улучшать систему производственной безопасности, основываясь на анализе результатов, обратной связи и изменениях в технологиях и стандартах безопасности. Внедряйте инновационные подходы и технологии для повышения эффективности и безопасности процессов исследования.

При соблюдении вышеперечисленных мер по обеспечению производственной безопасности можно минимизировать риски и обеспечить безопасную эксплуатацию исследования, связанного с влиянием шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности. Однако, следует отметить, что конкретные меры безопасности могут различаться в зависимости от специфики и условий работы с конкретной криволинейной поверхностью и шероховатостью.

Некоторые из дополнительных мер безопасности, которые могут применяться, включают:

Изолирование рабочей зоны: Ограничьте доступ к рабочей зоне только авторизованному персоналу, обеспечивая физическую изоляцию исследуемой поверхности от посторонних лиц. Это поможет предотвратить возможные травмы или неправильное использование оборудования.

Оценка рисков: Проведите систематическую оценку рисков, связанных с исследованием влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности. Идентифицируйте потенциальные опасности, такие как возможные повреждения оборудования, риски пожара или взрыва, и разработайте соответствующие меры по управлению рисками.

Использование защитного оборудования: Обеспечьте работников необходимыми средствами индивидуальной защиты (СИЗ) в соответствии с определенными рисками. Возможными средствами защиты могут быть защитные очки, защитные костюмы, перчатки, респираторы и другие.

Обучение и инструктаж: Обеспечьте обучение и инструктаж персонала, занятого в исследовании, относительно безопасных методов работы, процедур эксплуатации оборудования и мер безопасности, связанных с шероховатостью и аэродинамикой. Все работники должны быть осведомлены о потенциальных опасностях и знать, как правильно использовать СИЗ.

Соблюдение стандартов и регулирований: Убедитесь, что исследование проводится в соответствии с применимыми стандартами и регулированиями, связанными с безопасностью исследовательских процессов.

Анализ возможных вредных и опасных факторов при работе в научной лаборатории перспективных материалов представлен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Возможные вредные и опасные факторы

Факторы	Нормативные документы
---------	-----------------------

Опасные	Электробезопасность (Поражение электрическим током)	ГОСТ 12.1.009-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) ГОСТ Р12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»
	Производственный травматизм	ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)
Вредные	Отклонение показателей микроклимата	ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
	Недостаточная освещенность рабочей зоны	СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение (с Изменением №1 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
	Повышенный уровень шума	ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением № 1)
	Пожарная опасность	СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643) ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования
	Перенапряжение зрительного анализатора	ГОСТ 12.0.230-2007 ССБТ. Системы управления охраной труда. Общие требования СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
	Монотонность труда	MP 2257-80 Рекомендации по устранению и предупреждению неблагоприятного влияния монотонии на работоспособность человека в условиях современного производства
		Дата

В деятельности лаборатории широко используется электричество, которое при замыкании электрической цепи может быть опасным источником для организма человека. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, согласно ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» представлены в таблице 5.2.1.

Таблица 5.2.1 Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

Род тока	U, В	I, мА
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2.0	0.3
Переменный, 400 Гц	3.0	0.4
Постоянный	8.0	1.0

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, указанных в таблице. Средствами защиты от воздействия электрического тока являются: изолирующие устройства и покрытия, предохранительные устройства, устройства автоматического отключения, предупредительная сигнализация, знаки безопасности

Требования к производственному оборудованию согласно ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ: конструкция производственного оборудования и его отдельных частей должна исключать возможность их падения, опрокидывания и самопроизвольного смещения при всех предусмотренных условиях эксплуатации.

Микроклимат производственных помещений определяется действующими на организм человека температурой, относительной влажностью и скоростью движения воздуха, а также температурой окружающих поверхностей.

Длительное воздействие на человека неблагоприятного микроклимата резко ухудшает его самочувствие, снижает производительность труда и приводит к заболеваниям. Воздействие высокой температуры и влажности быстро утомляет, может привести к перегреву организма, повышению артериального давления, обезвоживанию организма. Понижение температуры и повышение скорости движения воздуха способствуют усилению конвективного теплообмена и процесса теплоотдачи

при испарении пота, что может привести к переохлаждению организма, частым респираторным заболеваниям. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности устанавливаются согласно СанПиН 2.2.4.548-96. Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений приведены в таблице 5.2.3.

Таблица 5.2.3 – Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	I _a (до 139)	22-24	21-25	60-40	Не более 0.1
Теплый	I _a (до 139)	23-25	22-26	60-40	Не более 0.1

Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах. Недостаточная освещенность рабочей зоны вызывает нарушение работы зрительного аппарата и общее утомление, может быть причиной головных болей, снижает производительность труда. Оптимальная освещенность производственных помещений и рабочей зоны обеспечивает гигиенические условия для работающего персонала. Правильно подобранные и расположенные источники света повышают эффективность труда, предотвращают заболевания персонала и минимизируют риски нарушения техники безопасности.

По способу размещения и распределению освещенности применяют общее и комбинированное освещение. Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПК должно осуществляться системой общего равномерного освещения.

В случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения, когда к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники, предназначенные для освещения зоны расположения документов. Устройство только местного освещения недопустимо, так как оно создает большую разность освещенности рабочих поверхностей и окружающего пространства,

что неблагоприятно сказывается на зрении, согласно СНиП 23-05-95*.

Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, должны быть ориентированы на север и северо-восток. Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения в соответствии с СанПиНом 2.2.1/2.1.1.1278-03 указаны в таблице 5.2.5.

Таблица 5.2.5 Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения

Помещение	Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г-горизонтальная, В-вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение	
		КЕО e_n , %		КЕО e_n , %	
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
Кабинеты, рабочие комнаты, офисы, представительства	Г-0.8	3.0	1.0	1.8	0.6
Помещение	Искусственное освещение				
	Освещенность, Лк				
	При комбинированном освещении		При общем освещении	Показатель дискомфорта, М, не более	Коэффициент пульсации освещенности, Кп %, не более
Всего	От общего				
Кабинеты, рабочие комнаты, офисы, представительства	400	200	300	40	15

Характеристика помещения лаборатории: длина = 7 м; ширина = 5 м; высота = 3.5 м; окраска стен – белая; окраска потолка – белая. Для освещения используются

светильники с люминесцентными лампами ОД 2-40, с длиной 1230 мм, шириной 266 мм, высотой 158 мм, КПД 75%.

Расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отраженный от потолка и стен:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_a \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 35 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{7 \cdot 0.49} = 5051 \text{ (лм)} \quad (5.6)$$

Нормируемая освещенность, согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 $E_H=300$ лм. В соответствии со значением рассчитанного светового потока $\varphi=5051$ Лм, ближайшей световой люминесцентной лампой является лампа типа ЛХБ с электрической мощностью осветительной системы 80 Вт, световым потоком 5000 лм.

Допускается отклонение светового потока лампы не более чем на $-10\% - +20\%$.

Для этого выполняется проверка по формуле

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\% = \frac{5000 - 5051}{5000} \cdot 100\% = -1.02\%$$

Таким образом, отклонение составило -1.02% , что не превышает допустимые нормы.

Расчет освещения производится методом коэффициента использования светового потока, который показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность и зависит от:

– индекса помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{35}{3.5 \cdot 12} = 0.83 \quad (5.7)$$

– коэффициента отражения стен (свежепобеленные, с окнами без штор): $\rho_{cm}=50\%$;

– коэффициент отражения потолка (свежепобеленный): $\rho_n=70\%$.

Для общего освещения применяются газоразрядные лампы: дневной (ЛД), холодно-белой (ЛХБ), тепло-белой (ЛТБ) и белой цветности (ЛБ).

Помещения лаборатории имеет следующие параметры:

– высота помещения: $H = 350$ см;

– расстояние светильников от перекрытия: $h_c = 35$ см;

Рассчитаем высоту светильника над полом, высоту подвеса:

$$h_n = H - h_c = 350 - 35 = 315 \text{ см} \quad (5.1)$$

- высота рабочей поверхности над полом: $h_{pn} = 75 \text{ см}$;
- рассчитаем высоту светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{pn} = 315 - 75 = 260 \text{ см} \quad (5.2)$$

При освещении рабочего помещения двухламповыми светильниками ОД при одиночной установке или при непрерывных рядах из одиночных светильников в соответствии с требованиями наименьшая допустимая высота подвеса над полом составляет 3.5 м. Рассчитанная величина $h=2.6$ м не соответствует требованиям.

- расстояние между соседними светильниками: $L = 3.75 \text{ м}$;
- расстояние от крайних светильников до стены: $l = 0.9 \text{ м}$.

Данное расстояние от крайних светильников до стены является подходящим, так как необходимая величина равна:

$$\frac{L}{3} = \frac{3.75}{3} = 1.25 \text{ (м)} \quad (5.3)$$

Отношение расстояния между светильниками L к высоте их подвеса h_n определяет величина, равная:

$$\lambda = L/h \quad (5.4)$$

Оптимальное значение для расположения люминесцентных светильников без защитной решетки типов ОД и ОДО составляет 1.4. Рассчитаем оптимальное расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1.4 \cdot 2.6 = 3.64 \text{ (м)} \quad (5.5)$$

Расположение светильников в лаборатории соответствует установленным требованиям. Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{\left(\frac{B - 2L}{3} \right)}{L} + 1 = \frac{\left(\frac{5 - 2 \cdot 3.75}{3} \right)}{3.75} + 1 = 1.66$$

Исходя из полученных результатов, оптимальным будет расположение светильников в два ряда. Количество светильников с люминесцентными лампами в ряду определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{\left(\frac{A - 2L}{3} \right)}{l_{\text{св}} + 0.5} = \frac{\left(\frac{7 - 2 \cdot 3.75}{3} \right)}{1.23 + 0.5} = 2.59$$

Оптимальное количество светильников в ряду 3. Таким образом, для соблюдения требований освещения лаборатории необходимо 6 светильников с люминесцентными лампами ОД 2-40.

Превышение уровня шума возникает при работе механических и электромеханических изделий. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83. «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности» допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях с шумным оборудованием, составляет 75 дБ.

В научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов основными источниками шума являются: принтер Vizon2, компьютеры (охлаждение внутри системного блока, оптические приводы DVD-ROM). В соответствии со спецификацией принтер Vizon2 имеет уровень шума 25 дБ. Уровень шума блока питания компьютера составляет 25-30 дБ, уровень шума охлаждающего устройства процессора 15-20 дБ, остальные элементы охлаждения являются пассивными и их уровень шума не учитывается. Шум, вызываемый работой оптических приводов, также не учитывается, так как они используются в работе незначительно малое время. Звукоизоляция в лаборатории не требуется, так как предельное значение уровня шума не достигается.

В зависимости от характеристик веществ и материалов, находящихся в помещении, по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г и Д в соответствии с СП 12.13130.2009. Рассматриваемое помещение лаборатории относится к категории В, так как в нем содержатся твердые горючие вещества в холодном состоянии. Возможные причины возгорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоках питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности.

Согласно ГОСТ12.1.004-91 профилактические мероприятия, подразделяются на организационно-технические, эксплуатационные и режимные. Организационно-технические мероприятия заключаются в проведении регулярных инструктажей

сотрудников ответственным за пожарную безопасность, обучении сотрудников надлежащей эксплуатации оборудования и необходимым действиям в случае возникновения пожара, паспортизацию веществ, материалов и изделий в части обеспечения пожарной безопасности, изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности. К эксплуатационным мероприятиям относят профилактические осмотры оборудования. Мероприятия режимного характера включают установление правил организации работ и соблюдение противопожарных мер.

Соблюдение правил пожарной безопасности, предотвращает возникновение возгораний и пожаров:

- содержание помещений в соответствии с требованиями пожарной безопасности;
- надлежащая эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электропитания, контроль нагрева оборудования);
- обучение производственного персонала правилам пожарной безопасности;
- наличие, правильное размещение и использование средств пожаротушения.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда, повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. В лаборатории, на этаже находится 2 огнетушителя ОП-3, переносные порошковые. Лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации

Безопасность в чрезвычайных ситуациях является важным аспектом при проведении исследования влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности. В случае возникновения чрезвычайных ситуаций, таких как пожар, авария или другие неожиданные события, необходимо предусмотреть соответствующие меры безопасности. Вот некоторые рекомендации:

План чрезвычайных ситуаций: Разработайте план действий на случай возникновения чрезвычайных ситуаций. В плане должны быть описаны процедуры эвакуации, использования средств пожаротушения, связи с экстренными службами и другие необходимые меры.

Обучение и тренировки: Проводите обучение и тренировки сотрудников, чтобы они знали, как реагировать на чрезвычайные ситуации. Это включает знание процедур эвакуации, умение пользоваться средствами пожаротушения и первой помощи, а также обучение коммуникации в экстренных ситуациях.

Оборудование безопасности: Обеспечьте наличие необходимого оборудования безопасности, такого как огнетушители, датчики дыма, системы пожарной сигнализации и аварийное освещение. Регулярно проверяйте работоспособность и готовность этого оборудования к эксплуатации.

Эвакуационные маршруты и планы: Обозначьте эвакуационные маршруты и места сбора, чтобы в случае необходимости люди могли быстро и безопасно покинуть рабочую зону и собраться в безопасном месте. Проводите проверки и испытания эвакуационных маршрутов и планов.

Связь с экстренными службами: Установите надлежащую связь с экстренными службами, такими как пожарная служба и скорая помощь, чтобы в случае чрезвычайной ситуации можно было вызвать помощь немедленно.

Изоляция опасных зон: В рабочей зоне, где проводится исследование влияния шероховатости на аэродинамику криволинейной поверхности, необходимо принять меры для изоляции опасных зон. Это может включать использование физических барьеров, знаков безопасности и ограничение доступа только авторизованным лицам.

Регулярное обслуживание и проверки: Проводите регулярное обслуживание и проверки оборудования, систем безопасности и других средств защиты, чтобы гарантировать их исправность и надежность в чрезвычайных ситуациях.

Обратная связь и улучшение: Систематически собирайте обратную связь от сотрудников и участников исследования относительно безопасности и предлагайте

улучшения в системах и процессах, чтобы постоянно совершенствовать безопасность в рабочей зоне.

Соблюдение законодательства: Соблюдайте требования законодательства, норм и стандартов, связанных с безопасностью, включая меры по предотвращению пожаров, обеспечению электробезопасности и управлению рисками.

Важно помнить, что безопасность в чрезвычайных ситуациях должна быть приоритетом при проведении исследования. Регулярное обучение, обновление планов и проверки оборудования помогут минимизировать риски и обеспечить безопасность всех участников и окружающей среды.

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Под источником ЧС понимают опасное природное явление, аварию или опасное техногенное происшествие, широко распространенную инфекционную болезнь людей, сельскохозяйственных животных и растений, а также применение современных средств поражения

Рассмотрим возможные аварийные ситуации:

– Пожар в здании в результате неисправности в электрических сетях, нарушения технологического режима, нарушения техники пожарной безопасности сотрудников.

Нормы пожарной безопасности при работе на ПЭВМ и сопутствующей оргтехнике утверждены в ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования».

- Работать только за исправным оборудованием.
- Не подключать одновременно к сети количество потребителей, превышающих допустимую нагрузку.
- Иметь первичные средства пожаротушения (огнетушители, пожарные гидранты).
- Свободные эвакуационные выходы.

– Расположение схемы эвакуационных путей в месте наибольшего сосредоточения сотрудников.

В случае возникновения пожара в здании автоматически срабатывают датчики пожаротушения, и звуковая система оповещает всех сотрудников о немедленной эвакуации из здания. На этаже находится два огнетушителя и пожарных крана, а также три эвакуационных выхода.

Мероприятия по защите населения при возникновении ЧС проводятся согласно ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения:

Эвакуация сотрудников из зоны ЧС.

– Использование средств индивидуальной защиты органов дыхания и кожных покровов.

– Проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ в зонах ЧС.

– Проведение мероприятий медицинской защиты (первая медицинская помощь).

6.4 Выводы по главе

В главе рассмотрены вредные и опасные факторы:

- электробезопасность (поражение электрическим током)
- производственный травматизм
- отклонение показателей микроклимата в лаборатории
- недостаточная освещенность рабочей зоны
- повышенный уровень шума
- пожарная опасность
- перенапряжение зрительного анализатора

Проведен расчет системы общего равномерного искусственного освещения для лаборатории. Рассмотрены чрезвычайные ситуации, и меры ликвидации их последствий. Мероприятия по предупреждению негативного воздействия вредных и опасных факторов на сотрудников, их соответствии нормативным требованиям описаны в соответствующих разделах главы.

Научная лаборатория перспективных материалов отнесена к классу В по пожароопасности и к 1 категории по электробезопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

В данной работе было проведено моделирование процесса горения впрыска жидкого гептана в камере сгорания с учетом теплового излучения с использованием численных методов. Целью работы было достичь более глубокого понимания сложного процесса горения жидкого топлива и его взаимодействия с окружающей средой.

В ходе исследования был проведен обзор существующих исследований и моделей, связанных с горением жидкого гептана. Были рассмотрены различные подходы и методы моделирования, а также учет теплового излучения.

На основе полученных данных была разработана численная модель, учитывающая взаимодействие топлива с окислителем, процессы сгорания и образование продуктов горения. Особое внимание было уделено моделированию теплового излучения, которое оказывает значительное влияние на процесс горения.

Проведенное численное исследование позволило анализировать распределение температуры, концентрацию компонентов и скорость горения впрыска жидкого гептана в камере сгорания. Также было исследовано влияние различных факторов, таких как скорость впрыска, температура окружающей среды и концентрация кислорода.

В результате моделирования было получено более глубокое понимание процесса горения впрыска жидкого гептана с учетом теплового излучения. Полученные результаты могут быть полезны для оптимизации и улучшения процессов горения, а также для разработки более эффективных систем сгорания и снижения воздействия на окружающую среду.

Однако следует отметить, что модель имеет свои ограничения и упрощения, которые могут оказывать влияние на точность результатов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на учет более сложных физических и химических процессов, а также на экспериментальную верификацию модели.

В целом, моделирование процесса горения впрыска жидкого гептана с учетом теплового излучения с использованием численных методов позволяет получить важные представления о характеристиках и поведении горения в данной системе. Это позволяет исследовать влияние различных параметров и условий на процесс горения, а также оптимизировать его для достижения желаемых результатов.

Моделирование горения с учетом теплового излучения также имеет практическое применение. Оно может быть использовано в разработке и оптимизации систем сгорания, таких как двигатели внутреннего сгорания, котлы и печи. Благодаря моделированию, можно предсказать распределение температуры, концентраций продуктов горения и других важных параметров, что помогает оптимизировать процессы сгорания с точки зрения эффективности и экологической безопасности. Однако, необходимо учитывать ограничения численных методов и моделей, используемых в данном исследовании. Они могут включать упрощения и приближения, которые могут оказывать влияние на точность результатов. Поэтому важно проводить дополнительные экспериментальные исследования для проверки и верификации модели.

В заключение, моделирование процесса горения впрыска жидкого гептана с учетом теплового излучения с использованием численных методов является эффективным инструментом для изучения и оптимизации горения жидкого топлива. Полученные

результаты позволяют лучше понять процессы, происходящие в камере сгорания, и использовать эту информацию для разработки более эффективных и экологически безопасных систем сгорания. Дальнейшие исследования в этой области помогут совершенствовать модели и методы, а также применять их на практике для достижения оптимальных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярин Л.П., Сухов Г.С. Основы теории горения двухфазных сред. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 240 с.
2. Зайцев С.А., Кузнецов В.Р., Кунцев Г.М. Влияние прогрева и испарения жидкого топлива на горение в модельной камере сгорания // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т. 27. – № 6. – С. 45–52.
3. Основы практической теории горения / Под ред. В.В. Поме ранцева. – Л.: Энергия, 1973. – 264 с.
4. Сполдинг Д.Б. Горение и массообмен. Пер. с англ. Р.Н. Гиза туллина и В.И. Ягодкина / Под ред. В.Е. Дорошенко. – М.: Ма шиностроение, 1985. – 240 с.
5. Amsden A.A., O'Rourke P.J., Butler T.D. KIVAII: A computer program for chemically reactive flows with sprays. – Los Alamos, 1989. – 160 p.
6. Аскарова А.С., Рыспаева М.Ж. Расчет горения впрыска жидко го топлива в замкнутой камере// Вестник КазНУ. Сер. Физиче ская. – 2006. – № 1. – С. 74–78
7. Аскарова А.С., Гороховски М.А., Локтионова И.В., Рыспа ева М.Ж. Горение жидких топлив в камере сгорания // Изве стия НАН РК. Сер. Физ.мат. – 2006. – № 3. – С. 10–14.
8. Рыспаева М.Ж. Моделирование горения жидких впрысков в камерах сгорания и

образования CO₂ // Физика окружающей среды: Матер. V Междунар. школы молодых ученых и специалистов. – Томск, 2006. – С. 120–124.

9. АскарOVA А.С., Волошина И.Э., Рыспаева М.Ж. Численное исследование влияния массы на процесс горения впрыска жидкого топлива // Проблемы промышленной теплотехники: Тез. докл. V Междунар. конф. – 22–26 мая 2007. – Киев, 2007. – С. 26–27.

10. Gorokhovski M., Borghi R. Numerical simulation of soot formation and oxidation in diesel engines // Journal of Diesels, Transactions of SAE. – 1993. – 930075

