

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

Институт Энергетический
Направление подготовки «Энергетическое машиностроение»
Кафедра «Парогенераторостроение и парогенераторные установки»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
«Исследование теплофизических процессов в рабочей зоне горелочных устройств с пористым наполнением»

УДК 662.951,2:536.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4А	Савченко Евгений Константинович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПГС и ПГУ	Хаустов Сергей Александрович			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МЕН	Попова Светлана Николаевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	Старший преподаватель		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПГС и ПГУ	Заворин Александр Сергеевич	д.т.н., профессор		

Томск – 2016 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Универсальные компетенции		
Р1	Способность и готовность самостоятельно учиться и развивать свой общекультурный и интеллектуальный уровень, изменять свой научный и научно-производственный профиль в течение всего периода профессиональной деятельности с учетом изменения социокультурных и социальных условий, вести педагогическую работу в области профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-11), Критерий 5 АИОР (п. 2.6.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р2	Способность проявлять и использовать на практике навыки и умения организации работ по решению инновационных инженерных задач в качестве члена или руководителя группы, нести ответственность, в том числе в ситуациях риска, за работу коллектива с применением правовых и этических норм при оценке и самооценке профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов, проблемных инженерных задач	Требования ФГОС ВО (ОК-2; ОПК-1; ПК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.3., п. 2.4., п. 2.5.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р3	Способность и готовность приобретать и применять новые знания и умения с использованием методологических основ научного познания и библиографической работы с привлечением современных технологий, понимать роль информации в развитии науки, анализировать её естественнонаучную сущность, синтезировать и творчески применять при	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	решении инновационных профессиональных задач	
Р4	Способность и готовность проявлять в инновационной деятельности глубокие естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте	Требования ФГОС ВО (ОК-1; ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р5	Способность осуществлять коммуникации в профессиональной сфере и в обществе в целом, принимать нестандартные решения с использованием новых идей, разрабатывать, оформлять, представлять и докладывать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке	Требования ФГОС ВО (ОК-2,3;ОПК-2,3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Профессиональные компетенции		
Р6	Способность и готовность выполнять инженерные проекты с использованием современных технологий проектирования для разработки конкурентно способных энергетических установок с использованием знаний теоретических основ рабочих процессов в энергетических машинах и аппаратах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,3), Критерий 5 АИОР (п. 1.3.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р7	Способность и готовность ставить и решать инновационные задачи инженерного профиля, анализировать, искать и вырабатывать компромиссные решения с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний в условиях неопределенности,	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	использовать методы решения задач оптимизации параметров в различных сложных системах	EUR-ACE и FEANI
P8	Способность и готовность проводить инновационные инженерные исследования, технические испытания и (или) сложные эксперименты, формулировать выводы в условиях неоднозначности с применением глубоких теоретических и экспериментальных методов исследований, современных достижений науки и передовых технологий, строить и использовать модели с применением системного подхода для описания и прогнозирования различных явлений, осуществлять их качественный и количественный анализ, описывать результаты выполненной работы, составлять практические рекомендации по их использованию	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-4,5,6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4, п. 1.6.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Способность и готовность оценивать техническое состояние объектов профессиональной деятельности, с применением современного оборудования и приборов, анализировать и разрабатывать рекомендации по их надежной и безопасной эксплуатации, понимать проблемы научно-технического развития сырьевой базы, современных технологий по утилизации отходов в энергетическом машиностроении и теплоэнергетике и научно-техническую политику в этой области	Требования ФГОС ВО (ОПК-1; ПК-7,8,9), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Способность и готовность к эффективному участию в программах освоения новой продукции	Требования ФГОС ВО (ПК-9,10), Критерий 5 АИОР

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	и технологий, использованию элементов экономического анализа в практической деятельности на предприятиях и в организациях, готовность следовать их корпоративной культуре	(п. 1.6, п. 2.1.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

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



Институт Энергетический
 Направление подготовки (специальность) 130303 «Энергетическое машиностроение»
 Кафедра Парогенераторостроения и парогенераторных установок

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой
Заворин А.С.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4А	Савченко Евгению Константиновичу

Тема работы:

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С ПОРИСТЫМ НАПОЛНЕНИЕМ.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	716/с от 03.02.16

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1 июня 2016 г.
--	----------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Введение (с обоснованием актуальности темы и цели работы) 1 Анализ конструкций горелочного устройства инфракрасного излучения 2 Описание основных подходов и алгоритмов для численного моделирования объекта исследования 3 Исследование прототипа 4 Модернизация геометрии горелочного устройства и численное моделирование аэродинамических процессов с использованием «ANSYS Fluent» 5 Аппробация результатов работы 6 Социальная ответственность 7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Заключение

Перечень материала	графического	
-------------------------------	---------------------	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Романцов И.И.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова С.Н.
Иностранный язык	Исакова Ю.И.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Основные разделы ВКР должны быть написаны на русском языке. Один из разделов работы (по согласованию с консультантом) переводится на иностранный язык

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	08.02.2016 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Хаустов С.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4А	Савченко Евгений Константинович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4А	Савченко Евгений Константинович

Институт	ЭНИН	Кафедра	ПГС и ПГУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Энергетическое машиностроение

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

<i>Характеристика объекта исследования и области его применения</i>	<i>Объектом исследования является математическая модель горелочного устройства с пористым слоем, которое предназначено для сжигания для утилизации жидких бытовых и производственных отходов.</i>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Планирование работ</i>	<i>Составить перечень работ, необходимых для достижения поставленных задач, определить участки каждой работы, установить продолжительности работ в рабочих днях.</i>
<i>2. Расчет трудоемкости работ</i>	<i>Составить перечень работ, необходимых для достижения поставленной задачи; определение участников работы; установление продолжительности работы в рабочих днях.</i>
<i>3. Расчет затрат на научно-исследовательскую работу</i>	<i>Рассчитать и определить: основные расходы на оборудование, заработную плату, дополнительную заработную плату, отчисления на социальные цели (едининый социальный налог), расходы на служебные командировки, расчет накладных расходов, издержки на услуги сторонних организаций, расходы на проведение научно-исследовательской работы.</i>
<i>4. Расчет цены договора научно-исследовательской работы</i>	<i>Расчет плановых накоплений (прибыль) и определение цены договора</i>
<i>5. Технико-экономическая оценка научно-исследовательской работы</i>	<i>Оценка проведенной работы</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	К.Э.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4А	Савченко Е.К.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4А	Савченко Евгений Константинович

Институт	Энин	Кафедра	ПГС и ПГУ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Энергетическое машиностроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Горелочное устройство инфракрасного излучения в составе теплогенератора.</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты) 	<p>1. Превышение предельно допустимых концентраций вредных газов и веществ содержащихся в них.</p> <p>2. Повышенный уровень шума на рабочем месте.</p> <p>3. Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны.</p> <p>4. Недостаточная освещенность рабочей зоны.</p> <p>5. Микроклимат.</p> <p>1. Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов.</p> <p>2. Движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и 	Вероятность возгорания топлива вне установки в следствии утечек из топливной системы.

эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.	
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Организация рабочего места в котельной.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	Старший преподаватель		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4А	Савченко Евгений Константинович		

РЕФЕРАТ

Диссертация состоит из 102 страниц, 35 рисунков, 10 таблиц, 26 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: математическое моделирование, пористый слой, горелки, инфракрасное излучение, топливные инжекторы, воздушные инжекторы, аэродинамика пористого слоя, максимальная температура, скорость, концентрация кислорода.

Объектом исследования является горелочное устройство инфракрасного излучения, в котором применена технология сжигания топлива в пористой матрице.

Цель работы – совершенствование существующей конструкции горелочного устройства и разработка рекомендаций по проектированию подобных устройств при помощи математического моделирования.

В процессе исследования проводились математическое моделирование объекта исследования с применением пакета прикладных программ ANSYS, анализ полученных результатов, расчёт необходимого соотношения топлива и окислителя, разработка конструктивной схемы горелочного устройства и разработка рекомендаций для проектирования данного вида горелок.

В результате исследования была получена общая картина процессов горения в пористом слое, поля изолиний основных теплофизических характеристик, параметры аэродинамики, температуры, массового состава топлива и окислителя. Была разработана конструкция горелочного устройства с пористой матрицей, разработаны рекомендации и подана заявка на патент [1].

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	14
1 Анализ конструкций горелочного устройства инфракрасного излучения	17
1.1 Обзор состояния практики конструирования горелочных устройств с пористой матрицей (ИК-излучения)	17
1.2 Выбор материала горелки	20
1.3 Выбор пористого наполнителя для горелки.....	21
1.4 Объект исследования.....	23
2 Описание основных подходов и алгоритмов для численного моделирования объекта исследования.....	25
2.1 Физико-математическая постановка задачи	27
3 Исследование прототипа.....	36
3.1 Математическое моделирование аэродинамики прототипа.....	36
3.2 Результаты численного исследования горелочного устройства инфракрасного излучения	42
4 Модернизация геометрии горелочного устройства и численное моделирование аэродинамических процессов с использованием «ANSYS Fluent».....	44
4.1 Разработка модели для математического моделирования.....	44
4.2 Численное моделирование конструктивной схемы №1	44
4.3 Численное моделирование конструктивной схемы №2.....	46
4.4 Результаты моделирования	47
4.5 Основные технико-экономические показатели разработанной конструкции горелки	52
5 Апробация результатов работы	54
5.1 Описание конструкции теплогенератора	54
6. Социальная ответственность	60
6.1 Производственная безопасность	61

6.2 Превышение предельно допустимых концентраций вредных газов и веществ содержащихся в них.....	61
6.3 Повышенный уровень шума в котельном цехе	63
6.4 Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны ...	64
6.5 Недостаточная освещенность рабочей зоны	65
6.6 Микроклимат	65
6.7 Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов	66
6.8 Движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования	67
6.9 Экологическая безопасность.....	67
6.10 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	68
6.11 Общие требования пожарной безопасности к техническому оборудованию	70
7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	73
7.1 Планирование работ	73
7.2 Расчет трудоемкости работ	74
7.3 Расчет затрат на научно-исследовательскую работу	75
7.4 Расчет цены договора научно-исследовательской работы	80
7.5 Техничко-экономическая оценка научно-исследовательской работы ...	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	82
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	85
Приложение А	88

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1 Обзор состояния практики конструирования горелочных устройств с пористой матрицей (ИК-излучения)

Процесс горения любого топлива является процессом окисления горючих составляющих с выделением тепла. Окислителем в этом случае является воздух, технический кислород или их смесь. Для подготовки топливновоздушной смеси служат горелочные устройства [12], которые в общем случае являются сложными в изготовлении техническими изделиями. Существует множество различных конструкций и назначений горелочных устройств. Некоторые из них, имеющие непосредственное отношение к теме настоящей работы, рассмотрены ниже.

Например, в беспламенной излучающей горелке, показанной на рис. 1 [13] газ, выйдя из форсунки 6, инжектирует воздух. Газовоздушная смесь, образуемая в инжекторе 5, поступает в распределительную коробку 4. Далее проходит через керамическую насадку 3, состоящую из огнеупорных плиток с большим количеством сквозных либо цилиндрических и/или конических каналов малого диаметра или ступенчатых каналов двух диаметров - вначале (по ходу смеси) меньшего и на выходе большего, затем сгорает у наружной поверхности плиток.

Состав газовоздушной смеси, близкий к стехиометрическому, хорошее перемешивание газа с воздухом и небольшая скорость выхода смеси обеспечивают возможность сгорания ее на поверхности насадка в тонком слое. Однако, незначительное отклонение от указанных пределов коэффициента избытка воздуха резко снижает эффект беспламенного сжигания газа. При увеличенном подсосе первичного воздуха температура насадка падает, а излучательная способность газогорелочного устройства понижается. При

пониженном подсосе появляются языки пламени, возникает неполнота сгорания, обуславливающая необходимость подвода вторичного воздуха.

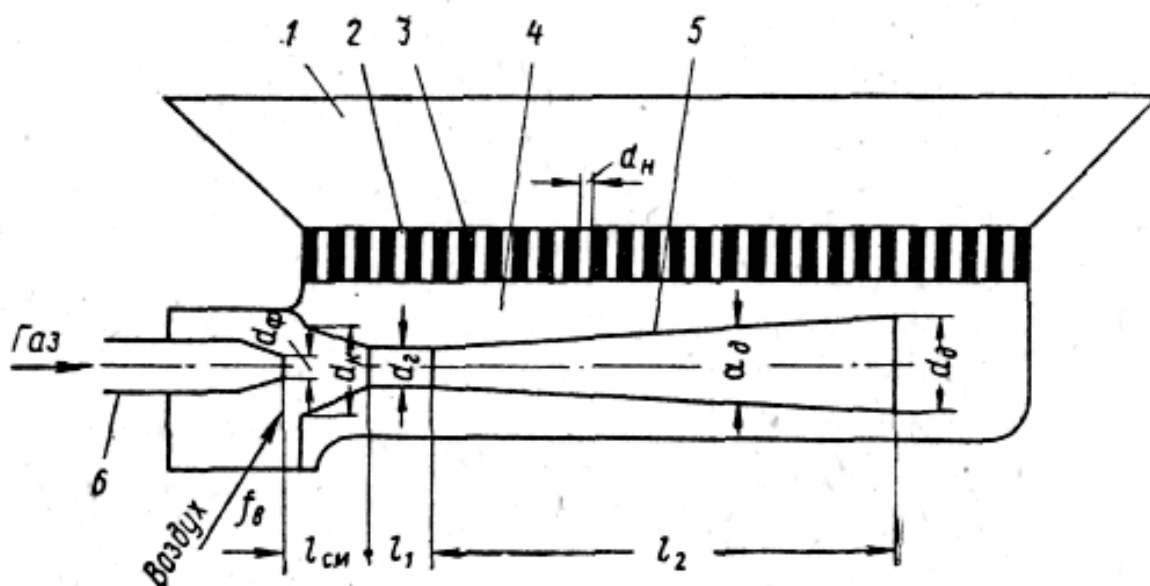


Рисунок 1 – Принципиальная схема беспламенной излучающей горелки [12]

- 1 – рефлектор; 2 – каналы в керамической насадке; 3 – насадка;
4 – распределительная коробка; 5 – инжектор-смеситель; 6 – форсунка

При сжигании газозвушной смеси на поверхности плоских перфорированных керамических плиток наблюдается неравномерность нагревания их поверхности. Появление зон с различной температурой нагрева объясняется различием в толщине перемычек между отверстиями и различием диаметров отверстий.

В горелке, представленной на рис. 2 [14], сжигание топлива происходит в пористой засыпке 6, ограниченной сетчатым инфракрасным излучателем 2. С помощью топливного инжектора 3, топливо подается в рабочую зону 6 и окисляется воздухом, подаваемым воздушными инжекторами 4. Данный способ перемешивания топливозвушной смеси является наиболее благоприятной для сжигания легковоспламенимых жидких топлив, так как пористая засыпка препятствует формированию критических объемов топлива, следовательно, уменьшает вероятность взрыва. В проницаемом мелкозернистом объеме

происходит увеличение теплоотдачи вследствие того, что отношение излучающей поверхности к объему больше, чем при классическом камерном сжигании [13]. Фракция зерен пористого наполнителя (пор) подбирается таким образом, чтобы не допустить проскока пламени.

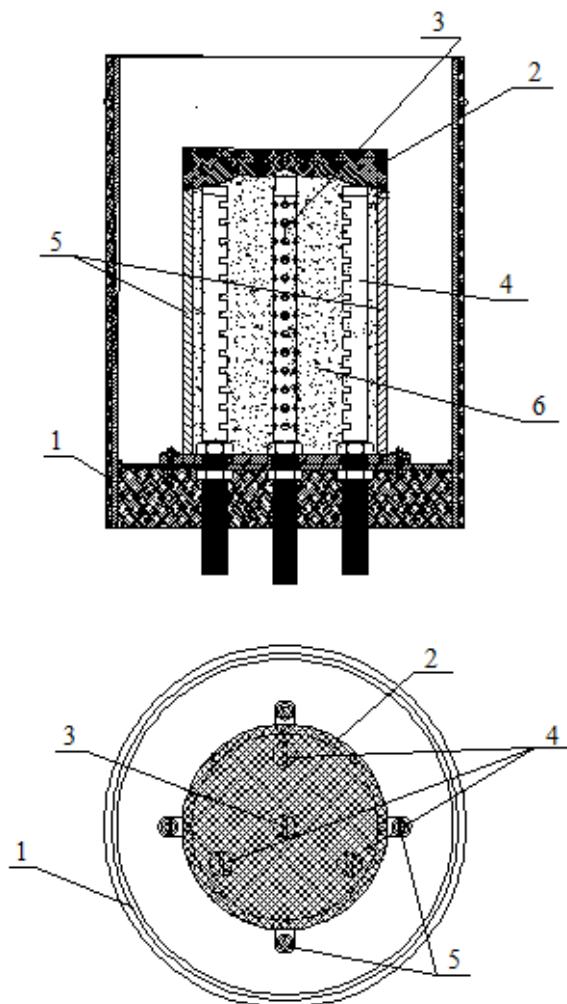


Рисунок 2 – Принципиальная схема горелочного устройства[13]

- 1 – корпус; 2 – сетчатая насадка-излучатель; 3 – топливный инжектор;
4 – воздушные инжекторы; 5 – опорный каркас; 6 – рабочая зона

Однако, при увеличении подачи топлива наблюдалось выбивание пламени из рабочего объема, что свидетельствует о физическом недожоге топлива внутри пористой засыпки.

Исходя из уже существующих горелочных устройств с использованием неметаллических излучающих элементов [13,14] особенно хорошо себя показали устройства с пористыми телами, используемые в качестве активных зон окисления и излучения. Таким образом, для оценки конструкции важную роль играют: материалы проектируемых горелок и системы подготовки топливной смеси. В отношении рассматриваемой темы – технике инфракрасного нагрева есть общие параметры проектирования и оценки конструкционных материалов. Одним из важнейших элементов агрегата является выбор наилучшего материала зоны горения.

Таким образом, в качестве тела рабочей зоны окисления принято использовать пористую неметаллическую среду.

1.2 Выбор конструкционных материалов для горелки

Для сжигания жидких и газообразных топлив важной задачей для обеспечения эффективного и безопасного сжигания топливно-воздушной смеси является выбор геометрии и материала элементов систем топливо- и воздухоподачи. Материалы выбираются таким образом, чтобы учесть экономико–технологические, эксплуатационные показатели, а именно: жаропрочность, циклическую прочность, ремонтпригодность, взаимозаменяемость, экономическую целесообразность использования [15–17].

При разработке прототипа горелочного устройства, для изготовления топливного, воздушных инжекторов и каркаса активной зоны горения, использовалась ферритная сталь марки 15Х25Т. Основной причиной использования данной марки стали является ее применение в сварных конструкциях, не подвергающихся воздействию ударных нагрузок и работающих в температурном диапазоне от минус 20 до 1300 °С. А именно при изготовлении теплообменной аппаратуры, деталей, зажигательных свечей

(электродов) работающих в агрессивных средах. Предел прочности такого материала составляет 461 МПа [18].

1.3 Выбор пористого наполнителя для горелки

Из опыта конструирования горелочных устройств инфракрасного излучения [13] можно сделать вывод, что при использовании керамических излучателей, неизбежно формируются зоны резко неравномерного распределения тепла, впоследствии стимулирующие уменьшение общей эффективности тепловосприятия тепловоспринимающими поверхностями. Поэтому при разработке технических устройств инфракрасного нагрева следует тщательно подбирать геометрию излучающих элементов. Исходя из этого, следует, что керамические насадки не долговечны и растрескиваются под действием резких изменений температуры, а также имеют большую стоимость в виду большей трудоемкости проработки оптимальной конструкции.

Криптол является зернистой, дисперсной системой с плотной однородной структурой. Получается при дроблении лома графитовых электродов, электродуговых печей или твердого шлакоостатка коксохимического производства со средним диаметром фракций 3–5 мм, зольностью, не превышающей 1–2 % [19] (рис. 3). Состав криптола большей частью состоит из углерода (95–98 %) и имеет развитую пористую структуру [20]. Исходя из того, что основным элементом в криптоле является углерод, который формирует его кристаллическую решетку, то температура плавления такого материала может достигать до 3500 °С [21,22], что говорит о высокой жароустойчивости криптола к температурным воздействиям.

Применение криптола, как рабочей зоны горения аргументировано не только его дешевизной и легкодоступностью, но и его электропроводностью. Для обеспечения стабильной работы горелочного устройства необходимо прогреть рабочую зону до такой температуры, которая оказалась бы выше температуры воспламенения топлива.



Рисунок 3 – Криптол (пористый наполнитель для горелки)

Из-за очень маленькой релаксирующей способности углерода, грануловидный состав является самым выгодным решением. Так как при термических воздействиях на криптол фракционный состав способствует беспрепятственному перемещению частиц в объеме, не вызывая механических напряжений структуры материала засыпки.

Применение этого материала на практике в электропечах показывает, что при температурах близких к 1300–1500 °С замечено постепенное уменьшение массы засыпки за счет ее частичного выгорания [2,19].

1.4 Постановка задач исследования

За прототип выбрано горелочное устройство инфракрасного излучения потому, что оно может быть изготовлено с использованием выбранных конструкционных материалов. Однако, следует пересмотреть конструктивные решения прототипа в соответствии с целью работы [14].

Основываясь на практических исследованиях, изложенных в различных материалах [2,14,15], рассмотрены основные геометрические характеристики горелочного устройства, выбранного за прототип, и изучен основной принцип организации процесса подготовки топливовоздушной смеси и интенсификации процесса сжигания жидких топлив. На основе анализа геометрических характеристик прототипа, была создана его компьютерная модель посредством Autodesk Inventor, преобразована в расчетную структурированную тетрагональную сетку с помощью ANSYS Workbench. Затем задавались граничные условия, а также области соответствующие каналам горелочных устройств, зона выхода, стен и изоляции.

Исходя из приведенного обзора аналогов и требований к конструкционным материалам для горелок, сформулированы следующие задачи исследования:

- выявление особенностей аэродинамической структуры зоны горения, при протекании реакции в слое пористой засыпки;
- определение функциональных зависимостей критериев эффективности работы горелки от параметров аэродинамической структуры зоны горения;
- детальное изучение процессов, протекающих в рабочем объеме горелочных устройств данного типа, для выявления особенностей аэродинамики прототипа и возможностей устранения недостатков существующих конструкций;

– внесение конструктивных доработок и разработка рекомендаций для проектирования аналогичных горелочных устройств.

Среди поставленных задач основополагающее значение имеет выявление особенностей аэродинамики зоны горения и её количественных параметров.

ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Натурные многофакторные исследования, связанные с экспериментальным изучением сложных процессов горения и теплообмена в пористой структуре, в том числе с вихревыми течениями, являются очень дорогостоящими, в связи с чем, зачастую, исследования производятся методом математического моделирования с применением современных программных продуктов. Многофакторная компьютерная оптимизация с применением ММ делает возможным конструирование высокоэффективных, экономичных и экологичных горелочных устройств [23].

В настоящее время в сфере научных исследований вычислительный эксперимент является одним из значительных направлений при изучении задач аэродинамики, теплообмена и горения. Информация, полученная с помощью численных расчетов, дает правильно осмыслить и понять физические процессы, наблюдаемые, например, на экспериментальных установках. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания». [24]. Математическое моделирование особенно полезно при разработке новых технологий, для оценки их работоспособности и оценки их потенциала, а также для анализа надёжности эксплуатации проектируемого оборудования.

Исследование аэродинамической структуры зоны горения, детальное изучение процессов, протекающих в рабочем объеме горелочных устройств данного типа, требует подробного изучения трехмерной структуры факела. При непрерывных процессах факел взаимодействует с пористым слоем, что существенно влияет на его температуру. Геометрические и прочие параметры факела зависят не только от геометрии горелочного устройства, но и от плотности, фракции и других характеристик наполнителя рабочей зоны, что

делает их коррелированными с критериями эффективности больше чем любые другие параметры процесса или режима. Чтобы учесть все перечисленные особенности протекания горения в пористом слое, следует брать на рассмотрение следующие физические процессы: радиационный и конвективный теплообмен, протекание химической реакции в турбулентном потоке и др.

ANSYS – наиболее известная универсальная программная система, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет. Данное ПО обладает высокой производительностью и является довольно популярным у специалистов различных инженерных направлений. Программная система ANSYS используется на таких предприятиях, как ABB, BMW, Boeing, Daimler-Chrysler, FIAT, Ford, БелАЗ, Mitsubishi, Siemens, Shell, Volkswagen-Audi и др., а также применяется на многих ведущих предприятиях промышленности РФ, пример, ГУП НИИ Мосстрой и т.д. [23].

На основе вышесказанного, в качестве инструмента исследования в настоящей диссертационной работе выбран ANSYS FLUENT. Потому что моделирование химических реакций, а в особенности турбулентных потоков, было отличительной особенностью FLUENT, начиная с момента его создания. FLUENT использует самые современные модели для описания химических реакций. База данных содержит свойства множества газообразных, твердых, угольных и жидких топливных материалов. Также FLUENT включает множество моделей турбулентности: несколько версий двухпараметрической модели k-epsilon, модель k-omega и модель напряжений Рейнольдса (RSM) [25].

2.1 Физико-математическая постановка задачи

2.1.1 Дискретизация расчетной области

Первым этапом моделирования является создание объемной модели расчетной области по геометрическим размерам реального прототипа [14] при помощи программного продукта Autodesk Inventor.

Следующим этапом математического моделирования является преобразование 3D модели в расчетную сетку (рис. 4) при помощи программного продукта ANSYS Workbench.

Далее готовая модель импортируется в расчетный модуль универсального пакета прикладных программ ANSYS Fluent.

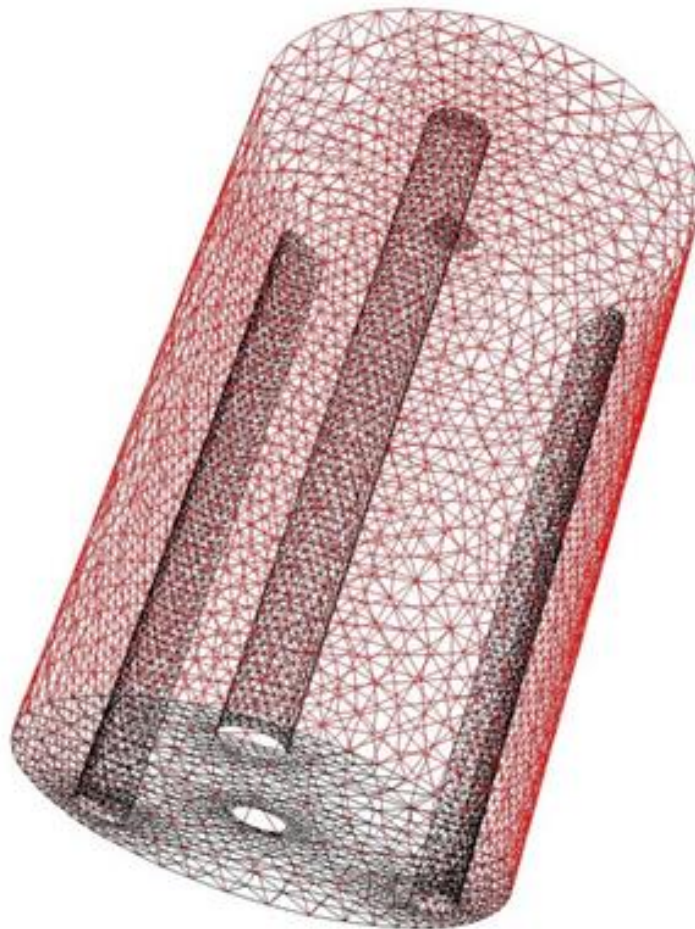


Рисунок 4 – Расчетная структурированная тетрагональная сетчатая модель

Выполнялись необходимые проверки для признания модели работоспособной. Затем выбиралась модель движения сред. Она описывается уравнением энергии для продуктов сгорания, уравнением теплопроводности, уравнением для трех координат и уравнением неразрывности. Описываемая система уравнений дополнена уравнениями переноса субстанции для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ϵ (эпсилон), поскольку используется стандартная k - ϵ модель турбулентности, лучистый теплообмен был рассчитан методом сферических гармоник в первом приближений (P1-модель). Расчет аэродинамики производился на основе законов сохранения энергии и неразрывности струй.

В ходе численного моделирования использовалась модель Сполдинга (Eddy-Break-Up), для исследования протекания химической реакции в турбулентном потоке, где скорость химической реакции пропорциональна интенсивности турбулентного перемешивания, а также кинетическая модель, согласно которой скорости реакции определяется уравнением Аррениуса. Таким образом, становится возможным моделирование течения с переходными режимами горения, определяющими условия существования пламени.

2.1.2 Уравнения математической модели

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

где ρ – плотность;

t – время;

x, y, z – координаты;

u, v, w – текущие компоненты вектора скорости частицы.

Уравнения Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \nu \text{grad} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \nu \text{grad} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \nu \text{grad} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right). \end{cases}$$

где t – время;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

ρ – плотность;

p – давление;

$\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$ – векторное поле скоростей;

\vec{f} – векторное поле массовых сил.

Неизвестные p и \vec{v} являются функциями времени t и координаты, где $\Omega \subset R^n$, $n=2,3$ – плоская или трёхмерная область, в которой движется жидкость. Обычно в систему уравнений Навье-Стокса добавляют краевые и начальные условия.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho a_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho a_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho a_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)$$

где $a_{\text{eff}} = \left(a + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right)$ – эффективный коэффициент температуропроводности (с учетом турбулентного переноса)

Уравнение переноса субстанции для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε через объёмные плотности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho k \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho k \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho k \bar{w}) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\varepsilon\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\varepsilon\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\varepsilon\bar{w}) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ G_k &= -\rho \bar{u}'u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \bar{u}'v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \rho \bar{u}'w' \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \rho \bar{v}'u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \bar{v}'v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \\ &- \rho \bar{v}'w' \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \rho \bar{w}'u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \bar{w}'v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \rho \bar{w}'w' \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \\ G_b &= -\beta g \frac{\mu_T}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned}$$

где G_k – слагаемое, описывающее генерацию кинетической энергии турбулентности;

G_b – слагаемое, описывающее генерацию турбулентности за счет плавучести.

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_T^2$$

где Y_M – величина, характеризующая затухание деформации (растяжения/сжатия);

M_T – турбулентное число Маха.

$$M_T = \frac{k}{w_{\text{ср}}^2}$$

Константы $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$; $C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{w}{u}\right|$; $C_\mu = 0,09$

Уравнение переноса излучения для P-1 модели:

$$-\nabla q_r = AG - 4A\sigma_0 T^4$$

где A – коэффициент поглощения среды;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана;

G – падающее излучение.

Кинетическая скорость реакции определяется следующей формулой

$$w_{kin} = A_k \cdot p^2 \cdot c_f \cdot c_{ox} \cdot \exp[-E / (R_{un} \cdot T)]$$

где A_k – постоянный коэффициент, м³/(кг·с);

E – энергия активации химической реакции, Дж/моль;

R_{un} – универсальная газовая постоянная.

Скорость турбулентного горения, согласно EBU модели, вычисляется по формуле

$$w_t = A_{EBU} \cdot p \cdot (\varepsilon / k) \cdot \min\{c_f \cdot c_{ox} / \nu\}$$

где ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;

K – удельная кинетическая энергия турбулентности;

A_{EBU} – коэффициент модели.

После вычисления кинетической и турбулентной скоростей горения скорость реакции окончательно определяется выражением, аналогичным формуле Щёлкина.

$$w = \sqrt{w_{kin}^2 + w_t^2}$$

Использование этой формулы дает возможность моделировать переход как от турбулентного к ламинарному режиму горения при уменьшении интенсивности турбулентного перемешивания, так и наоборот, от ламинарного режима к турбулентному, соответственно, при увеличении интенсивности.

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2}$$

$$v' = \zeta \sqrt{v'^2}$$

$$w' = \zeta \sqrt{w'^2}$$

Использовалась стандартная k - ε модель турбулентности. Модели турбулентности с двумя параметрами аналогичные k - ε в качестве фундаментального соотношения используют гипотезу Буссинеска, выражающую связь напряжений Рейнольдса с тензором скорости деформаций посредством эффективной турбулентной вязкости. Согласно Колмогорову эффективная турбулентная вязкость является линейной функцией турбулентного числа Рейнольдса Re . Однако первые применения моделей турбулентности указывали на более сложную зависимость, что привело к

использованию модельных функций турбулентного числа Рейнольдса. Соответствующие модели позволяют моделировать турбулентность в ядре потока, в области больших турбулентных чисел Рейнольдса. В процессе развития моделей турбулентности снова вернулись к идее Прандтля о влиянии стенки на пространственный масштаб турбулентности. Современные модели турбулентности позволяют моделировать турбулентность во всей области течения, включая вязкий подслой [23]. Такая возможность достигается использованием модельных функций двух аргументов: турбулентного числа Рейнольдса и безразмерной пространственной координаты y^+ , определяющей положение произвольной точки потока относительно ближайшей стенки канала [24,25].

2.1.3 Исходные данные для расчета

Все геометрические размеры для численного моделирования были получены от существующего прототипа [2], исходные данные для моделирования были получены в ходе экспериментального испытания горелочного устройства. Результаты испытаний представлены в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Результаты испытаний (один цикл) [2]

Время регистрации показаний	Номер термопарь	Показание милливольтметра мВ	Температура °С	Расход топлива $\text{м}^3/\text{с} \times 10^8$	Расход воздуха $\text{м}^3/\text{с} \times 10^3$
1	2	3	4	5	6
12 ⁰⁰	1	0	20	-	-
	2	0	20		
	3	0	20		
	4	0	20		
	5	0	20		
12 ⁰⁵	1	4,6	131,4	8,3	4,4
	2	4,9	140,0		
	3	5,0	142,8		
	4	5,1	145,7		
	5	5,6	160,0		

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
12 ¹⁰	1	12,8	365,7	11,7	4,4
	2	11,9	340,0		
	3	12,7	362,9		
	4	13,8	394,3		
	5	8,1	231,4		
12 ²⁰	1	23,8	680,0	15	4,4
	2	26,0	742,8		
	3	23,7	677,1		
	4	26,1	745,7		
	5	10,8	308,6		
12 ³⁰	1	24,3	694,2	16,7	4,4
	2	27,1	774,2		
	3	26,8	765,7		
	4	27,7	791,4		
	5	12,3	350,4		
12 ⁴⁰	1	16,2	462,8	-	-
	2	15,3	437,1		
	3	14,8	422,8		
	4	15,9	454,2		
	5	8,9	254,3		
12 ⁵⁰	1	12,8	365,7	-	-
	2	11,5	328,6		
	3	11,6	331,4		
	4	12,3	351,4		
	5	6,1	174,3		
13 ⁰⁰	1	6,3	180,0	-	-
	2	6,9	197,1		
	3	8,7	248,6		
	4	7,8	222,9		
	5	4,6	131,4		

Для осуществления расчета необходимо экспериментально определить аэродинамическое сопротивление пористой засыпки – криптола, так как автору не удалось найти эту информацию в справочной литературе. Для нахождения коэффициента аэродинамического сопротивления требуется потеря давления в пористом слое, расход и температура воздуха (для определения его плотности). Все необходимые значения получены в натурном эксперименте авторами и представлены в таблице 2 [15]. Схема испытательного стенда показана на рисунке 5.

Таблица 2 – Результаты аэродинамических испытаний при разном размере фракций засыпки рабочей зоны [15]

Расход воздуха через горелку $\text{м}^3/\text{с}, *10^6$	Аэродинамическое сопротивление горелки, Па	
	Фракция, мм	
	3...5	5...7,5
425	1	1
850	8	2
1061	30	10
1272	40	20
1486	50	30

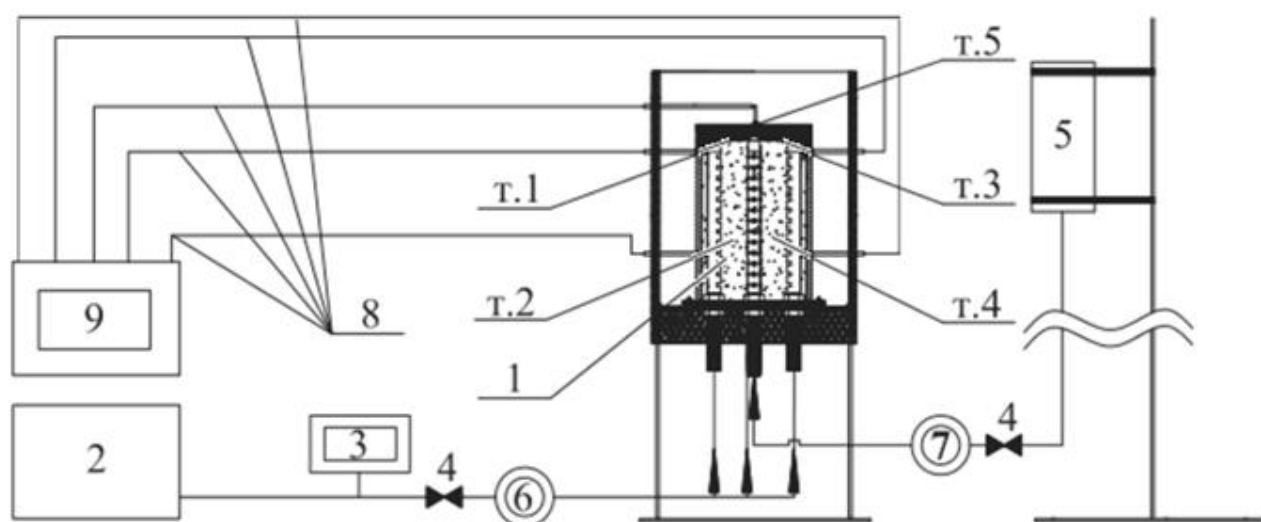


Рисунок 5 – Схема испытательного стенда

1 – горелочное устройство, 2 – компрессор, 3 – напоромер, 4 – игольчатый вентиль, 5 – емкость, 6 – ротаметр (тип РП-5), 8 – термопары (№1,2,3,4,5), 9 – милливольтметр

В настоящей работе расчетным способом обработаны результаты этого эксперимента, и на основе расхода среды и потери давления определены и настроены граничные и рабочие условия математической модели в полном соответствии с реальными условиями, наблюдаемыми в реальном эксперименте [15]. К граничным условиям относятся параметры воздушных

инжекторов, топливных инжекторов, выходного отверстия и параметры стенок. Важным этапом настройки модели является задание материалов, в том числе участвующих в реакции. Отдельно вводятся граничные условия для пористого слоя, такие как его аэродинамическое сопротивление и величина фракции. Затем параметры выводятся на видовой экран, и запускается расчет.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА

В ходе экспериментального испытания горелочного устройства инфракрасного излучения были получены значения температуры внутри пористого слоя, а также визуально были доказаны положительные излучающие свойства пористой засыпки (рис. 6). Однако, уже на стадии эксперимента, при увеличении расхода топлива, наблюдались проскоки пламени за пределы пористого слоя [14].

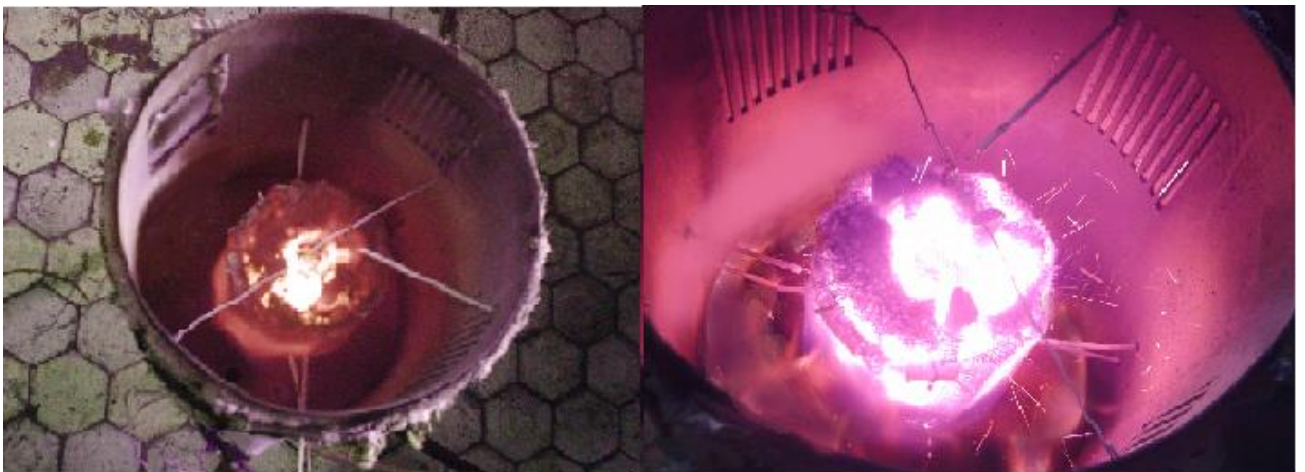


Рисунок 6 – Излучение от горелочного устройства на различных режимах работы [14]

Целью численного моделирования является подробное изучение особенностей аэродинамической структуры рабочей зоны горелочного устройства, а также расчет распределения массовых долей топлива и воздуха по мере их реагирования.

3.1 Математическое моделирование аэродинамики прототипа

Для численного исследования к рассмотрению принималась полная геометрическая модель горелки (рис. 7).

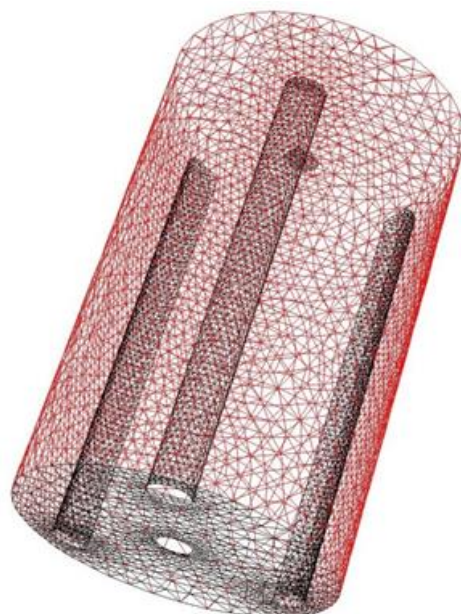


Рисунок 7 – Структурированная расчетная сетка горелки

Одним из основных параметров по оценке численного моделирования процессов горения, является анализ значений температуры и её распределения в объеме моделируемой установки. На основе такого анализа можно определить степень соответствия компьютерной модели с реальным физическим экспериментом (табл. 1), поскольку в эксперименте проводились замеры температуры в объеме горелочного устройства (рис. 5) [14]. Результаты сравнения (табл. 3) можно считать удовлетворительными, а выбранную математическую модель достоверной.

Таблица 3 – Результаты сравнения

	Эксперимент [13]	Мат. модель
Термопара 1	694,2	715
Термопара 2	774,2	798
Термопара 3	765,7	787
Термопара 4	791,4	807

Также можно произвести адекватное сравнение с расчётными характеристиками, полученными в ходе численного моделирования горелочного устройства (рис. 8). Как видно из данного графика, максимальная температура (1256 °С) находится около пристеночной области. В ходе эксперимента не было установлено её значение, так как термопары были расположены ближе к центру пористого слоя. Полученная максимальная температура (1256 °С) близка к температуре плавления выбранного материала стенки (1300 °С), поэтому для обеспечения ресурса горелки, горение должно протекать в ее центре, в месте пересечения воздушных потоков и потоков топлива, подаваемых из каналов. По результатам моделирования, в данном случае этого не наблюдается, что можно объяснить неполнотой сгорания топлива при контакте его с воздушными потоками, и последующим догоранием в пристеночной области, за счет воздуха, полученного извне.

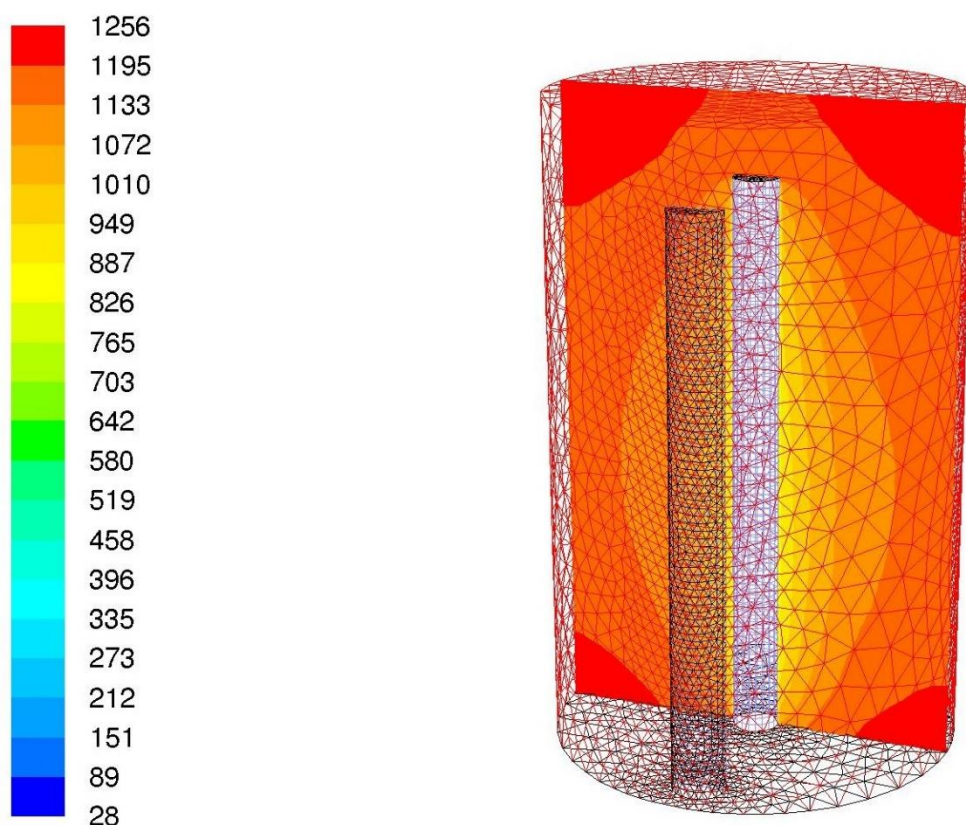


Рисунок 8 – Распределение температуры в продольном сечении горелки (°С)

В качестве начальных данных для моделирования задавалась высокая температура (выше температуры самовоспламенения, 2000 °С) во всем объеме горелочного устройства, которая гарантировала бы воспламенение топлива.

Также задавалась подачи топлива (500 °С) с учетом его прогрева в топливном канале и начальная температура воздуха (30 °С).

В ходе численного эксперимента установлено, что существенным недостатком исследуемого прототипа является то, что горелочное устройство не обладает корпусом. Это дает возможность окислителю покидать зону горения, не прореагировав (рис. 9). Следствием этого является недожог топлива (рис. 10).

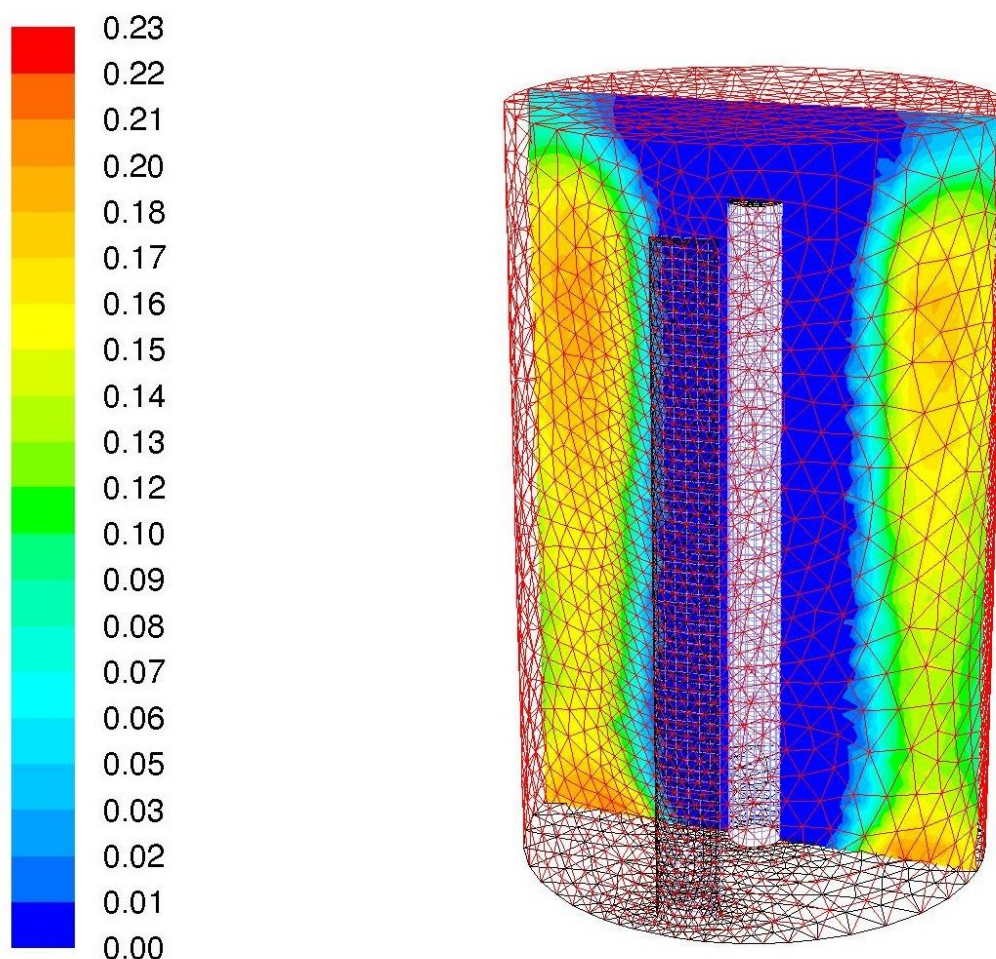


Рисунок 9 – Распределение массовой доли O_2 в продольном разрезе горелки (%)

По результатам численного моделирования видно, что данная конструкция подвода топлива и воздуха не обеспечивает перемешивания воздушной и топливной сред. Топливо, не догоревшее в объеме горелочного устройства, догорает на его поверхности, что идет в разрез с назначением горелочного устройства данного типа.

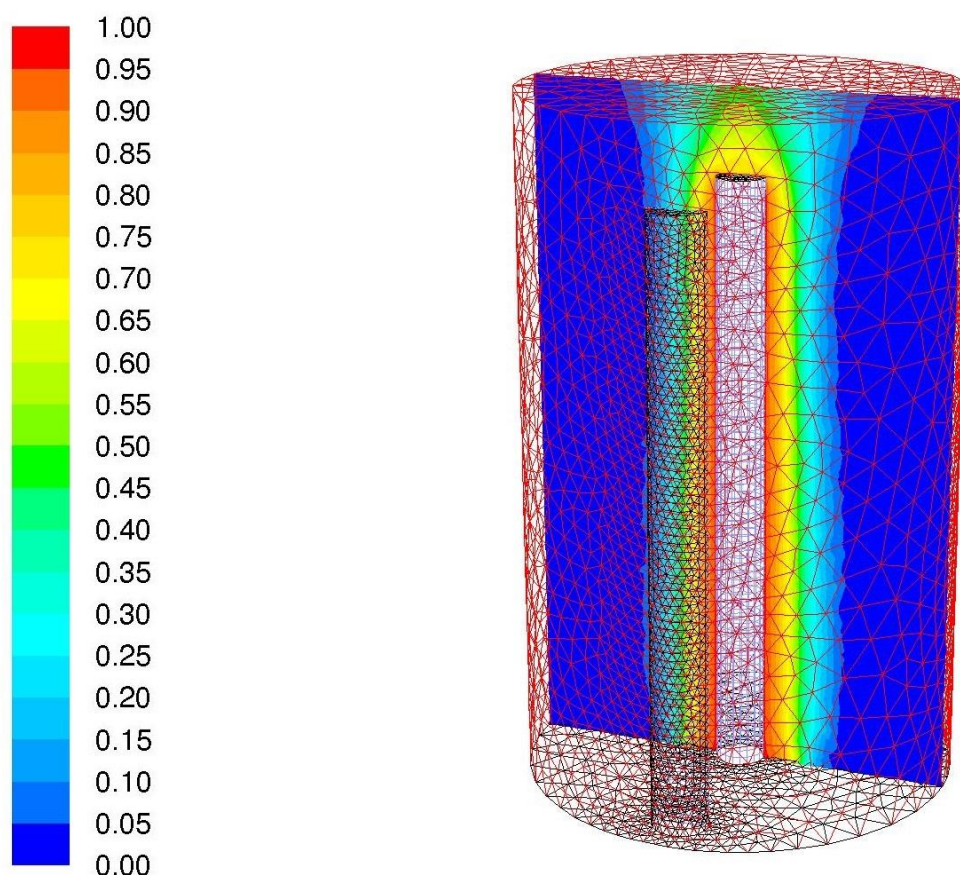


Рисунок 10 – Распределение массовой доли топлива в продольном сечении горелки (%)

Анализируя график скорости химической реакции можно сказать, что скорость химической реакции распределена неравномерно по объему пористого слоя и достигает наибольшего значения лишь непосредственно в тех участках, где соприкасаются воздушные и топливные потоки (рис. 11). Также отметим, что воздушные инжекторы, расположенные по кругу и впускными отверстиями направлены к центру. В процессе работы такое их расположение создает

аэродинамические сопротивления в рабочей зоне горелки, вследствие чего топливные струи разбиваются на три хорошо различимых потока, что препятствует их интенсивному перемешиванию с окислителем.

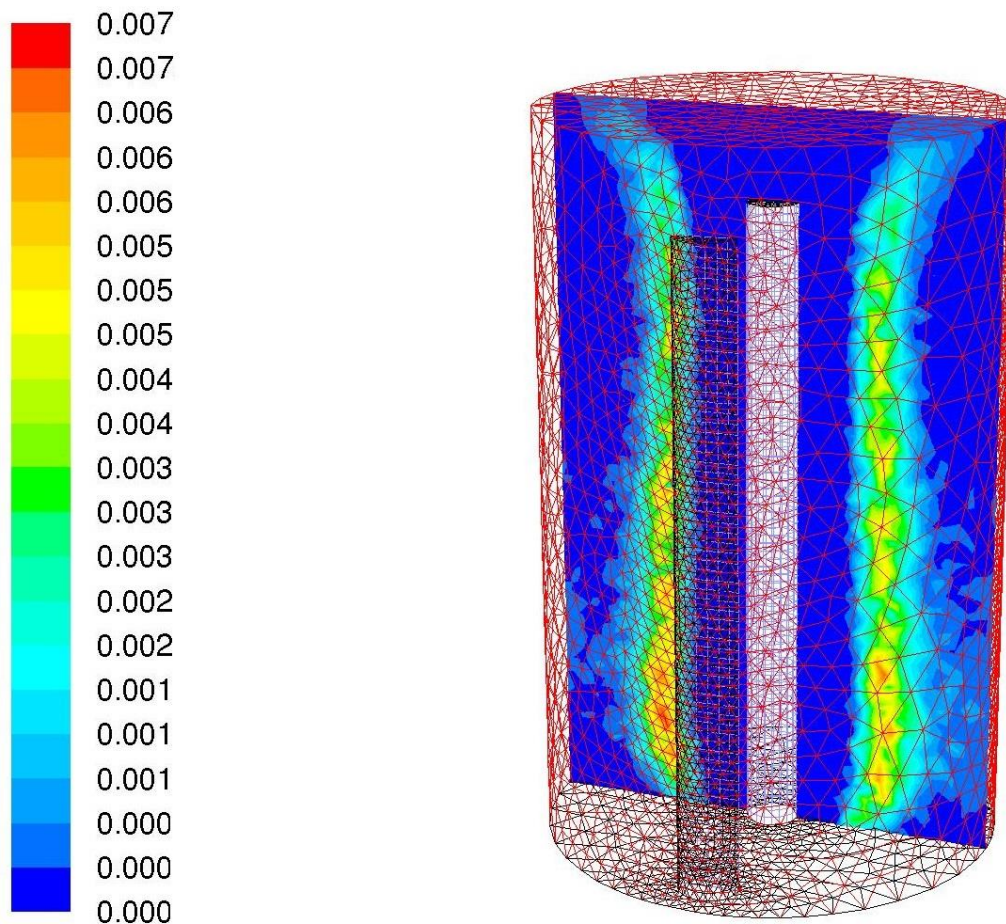


Рисунок 11 – График скорости химической реакции в продольном сечении горелки ($\text{кмоль}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$)

Траектория топлива направлена от центра горелочного устройства по нормали к периферии, что существенно сокращает зону соприкосновения топлива и воздушной смесью (рис. 12), часть топлива под давлением, создаваемым воздушными потоками, устремляется к вершине горелочного устройства, не принимая участия в реакции горения (рис. 10). Также большая часть воздуха, направленного к центру, мгновенно разворачивается и выходит из пористого слоя, не прореагировав с топливом, что отрицательно сказывается

на КПД-нетто установки в целом, так как энергия, потраченная на подачу воздуха в пористый слой, расходуется впустую. В ходе численного моделирования установлено, что времени соударения топливных и воздушных потоков недостаточно для полного их перемешивания и выгорания.

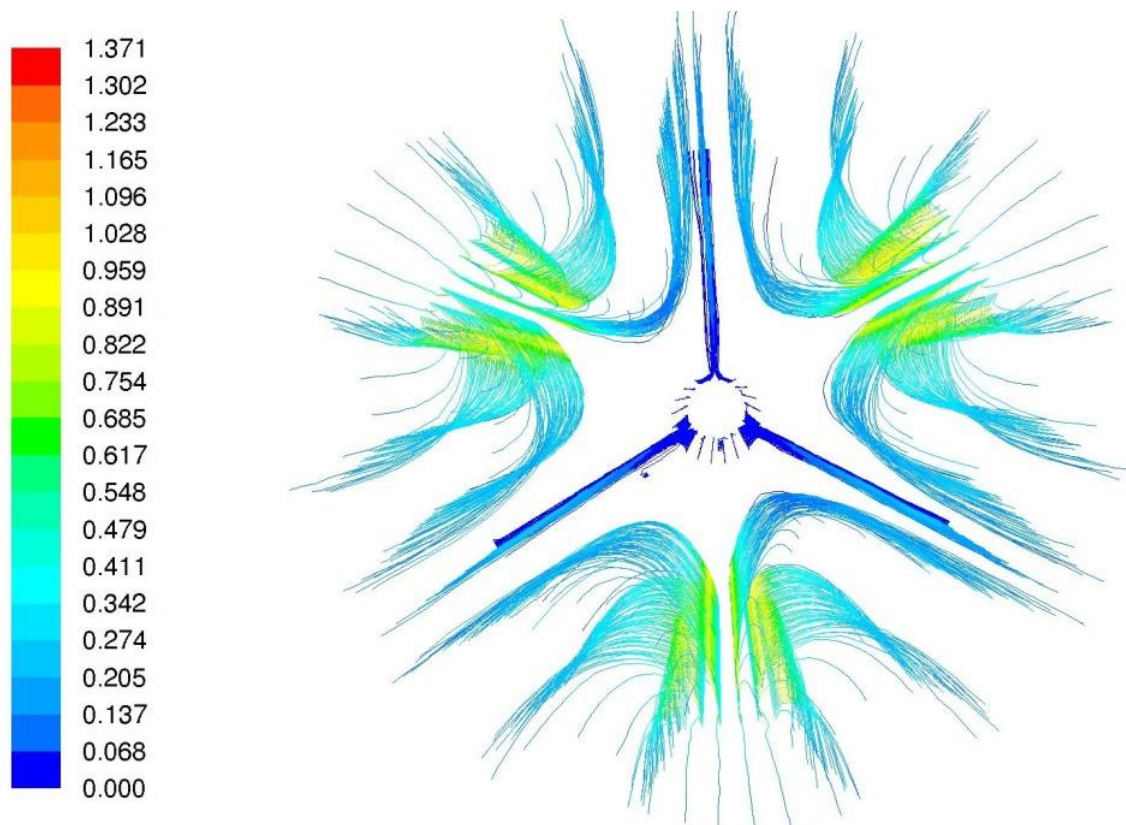


Рисунок 12 – Линии тока, с цветовой индексацией по скорости потока в поперечном сечении ($\text{кмоль/м}^3 \cdot \text{с}$)

3.2 Результаты численного исследования горелочного устройства

Выявленные особенности прототипа могут использоваться при совершенствовании его конструктивной схемы и последующей разработки рекомендаций для проектирования горелочных устройств. По результатам анализа можно отметить следующие конструктивные недостатки прототипа:

- геометрическое расположение инжекторов не позволяет тщательно перемешивать топливовоздушную смесь;

– применение данной схемы подвода топлива и окислителя нецелесообразно без жесткого корпуса.

Вывод: для устранения недостатков конструкции необходимо "зажать" реакцию в рабочей зоне и добиться полного выгорания воздуха и топлива внутри пористого слоя.

ГЛАВА 4. МОДЕРНИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «ANSYS FLUENT»

4.1 Разработка модели для математического моделирования

На данном этапе рассмотрены несколько вариантов конструкции горелочных устройств. Однако, хочется отметить, что за основу были взяты геометрические размеры первого прототипа [2]. Это было сделано для сопоставления результатов моделирования с реальным экспериментом.

4.2 Численное моделирование конструктивной схемы №1

Расчетная сетка конструктивной схемы горелочного устройства представлена на рисунке 13.

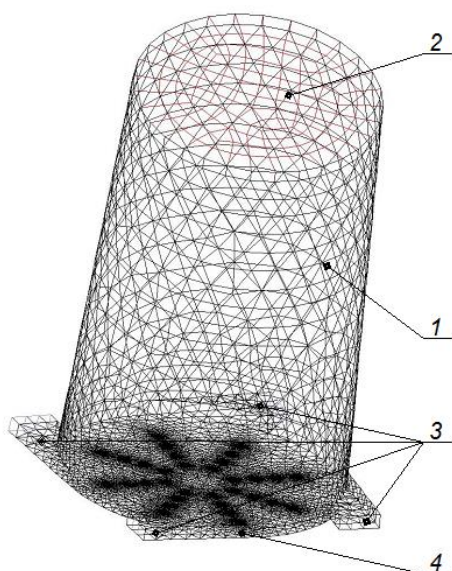


Рисунок 13 – Расчетная сетка конструктивной схемы горелочного устройства

1 – пористый слой; 2 – выходное окно; 3 – воздушные эжекторы; 4 – топливные каналы

Принципиальным отличием данной конструкции от прототипа является то, что здесь имеется жесткий корпус. Наличие корпуса в горелочном устройстве подобного рода является важным аспектом, так как он позволяет удерживать топливо и окислитель в рабочей зоне горелочного устройства и не дает им преждевременно покинуть зону горения. Также отличительной чертой данной конструкции является нижнее расположение каналов топлива и воздуха, что в теории позволяет тщательней перемешивать горючую смесь, так как время перемешивания увеличено за счет необходимости её прохождения через пористый слой по всей высоте горелки. Был принят тангенциальный подвод воздуха в горелочное устройство с целью создания завихрений и обеспечения оптимального перемешивания топлива с окислителем.

Однако на стадии моделирования был выявлен крупный недостаток данной конструкции. При попадании струй воздуха в пористый слой, все вращение воздушной среды терялось за счет большого сопротивления пористого слоя. Воздух был вынужден огибать частицы криптола по пути наименьшего сопротивления (рис. 14).

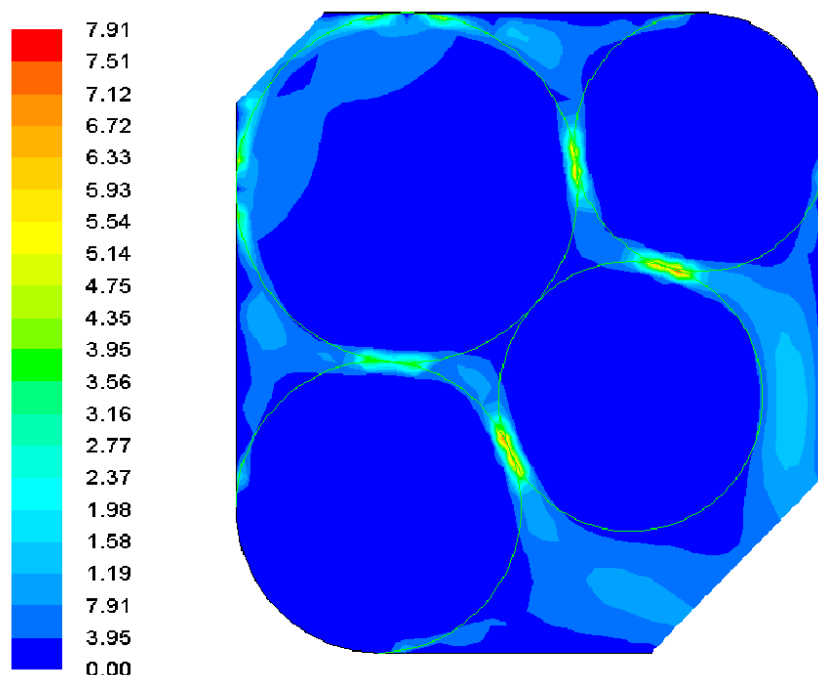


Рисунок 14 – Обтекание криптоловых частиц воздушными потоками с цветовой индексацией по скорости потока (м/с)

Анализируя результаты численного моделирования, можно сделать вывод, что тангенциальный подвод воздуха в рабочую зону является нецелесообразным.

4.3 Численное моделирование конструктивной схемы №2

В ходе выполнения настоящей ВКР создан вариант конструкции горелочного устройства, с учетом проведенного анализа горелочного устройства инфракрасного излучения (рис. 15).

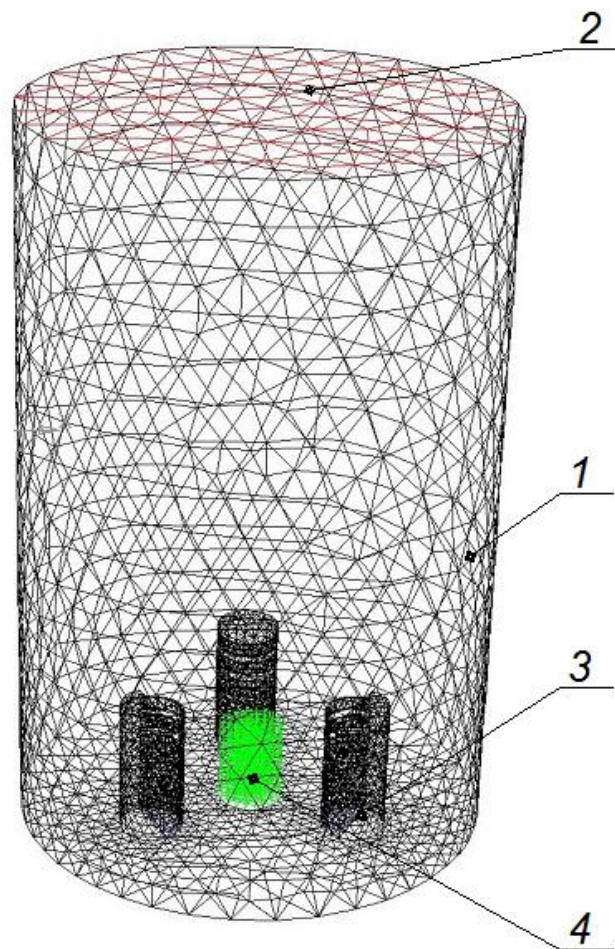


Рисунок 15 – Конструктивная схема горелочного устройства с пористым слоем
1 – пористый слой; 2 – выходное окно; 3 – топливный эжектор;

4 – воздушный эжектор

Отличием данной конструкции от прототипа [2] является то, что инжекторы подачи топлива и воздуха значительно короче. Центральным инжектором теперь является воздушный, а по периферии располагаются топливные. Каналы топливных инжекторов направлены к центру горелочного устройства таким образом, что при подаче топлива в рабочий объем, оно под действием гравитации будет направлено в сторону воздушного инжектора. В свою очередь поток окислителя из центрального инжектора будет подхватывать топливо, и по мере прохождения пористого слоя, будет обеспечиваться оптимальное их перемешивание и, как следствие, выгорание. В тоже время горелочное устройство сохранило жесткий корпус из конструктивной схемы №1.

4.4 Результаты моделирования

Результаты численного эксперимента показывают, что поставленные задачи по устранению недожога топлива и выбивания пламени за пределы пористого слоя были успешно решены. Об этом можно судить по итогам расчета (рис. 16). На основе анализа графика распределения температуры можно судить о том, что температура горения в центре пористого слоя, которая составляет около 1100–1200 °С, по мере отдаления от центра уменьшается и в пристеночной области составляет около 1000 °С, что позволяет обеспечить надежную работу корпуса горелочного устройства, так как эта температура меньше, чем температура плавления материала стенок.

Таким образом, исходя из картины распределения температур, можно судить о том, что реакция протекает внутри пористого слоя, не выходя за его пределы. Как видно из данного графика, максимальная температура шкалы составляет 1357 °С, что говорит о наличие неких локальных максимумов

температуры в ядре горения. В то же время в объеме рабочей области температурное распределение является равномерным (рис. 16).

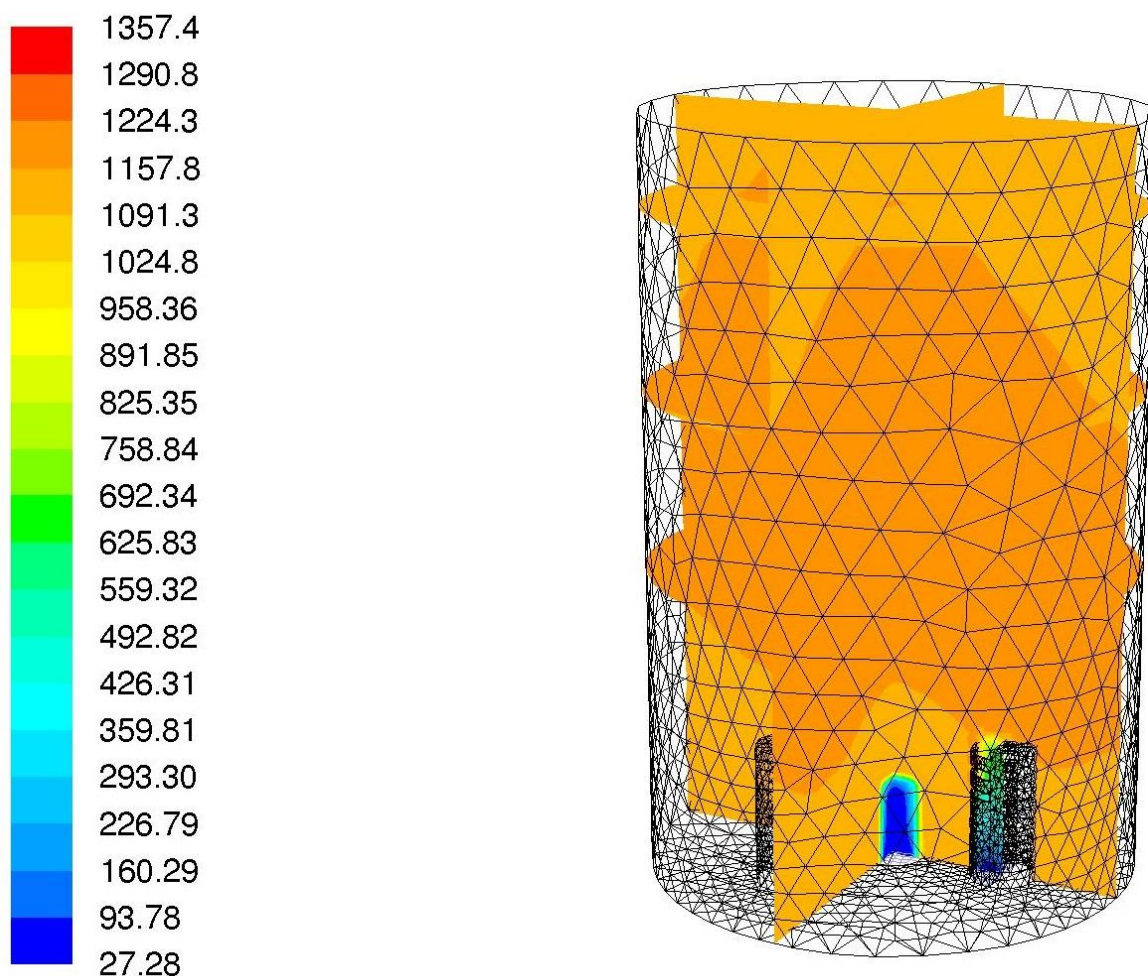


Рисунок 16 – Распределение температуры в продольном сечении горелки (°C)

В ходе численного эксперимента установлено, что наличие жесткого корпуса позволило увеличить время нахождения топлива и окислителя в пористом слое, соответственно увеличив время их реагирования. График распределения массовой доли топлива (рис. 17). в продольном сечении горелки следует рассматривать совместно с графиком распределения воздуха (рис. 18).

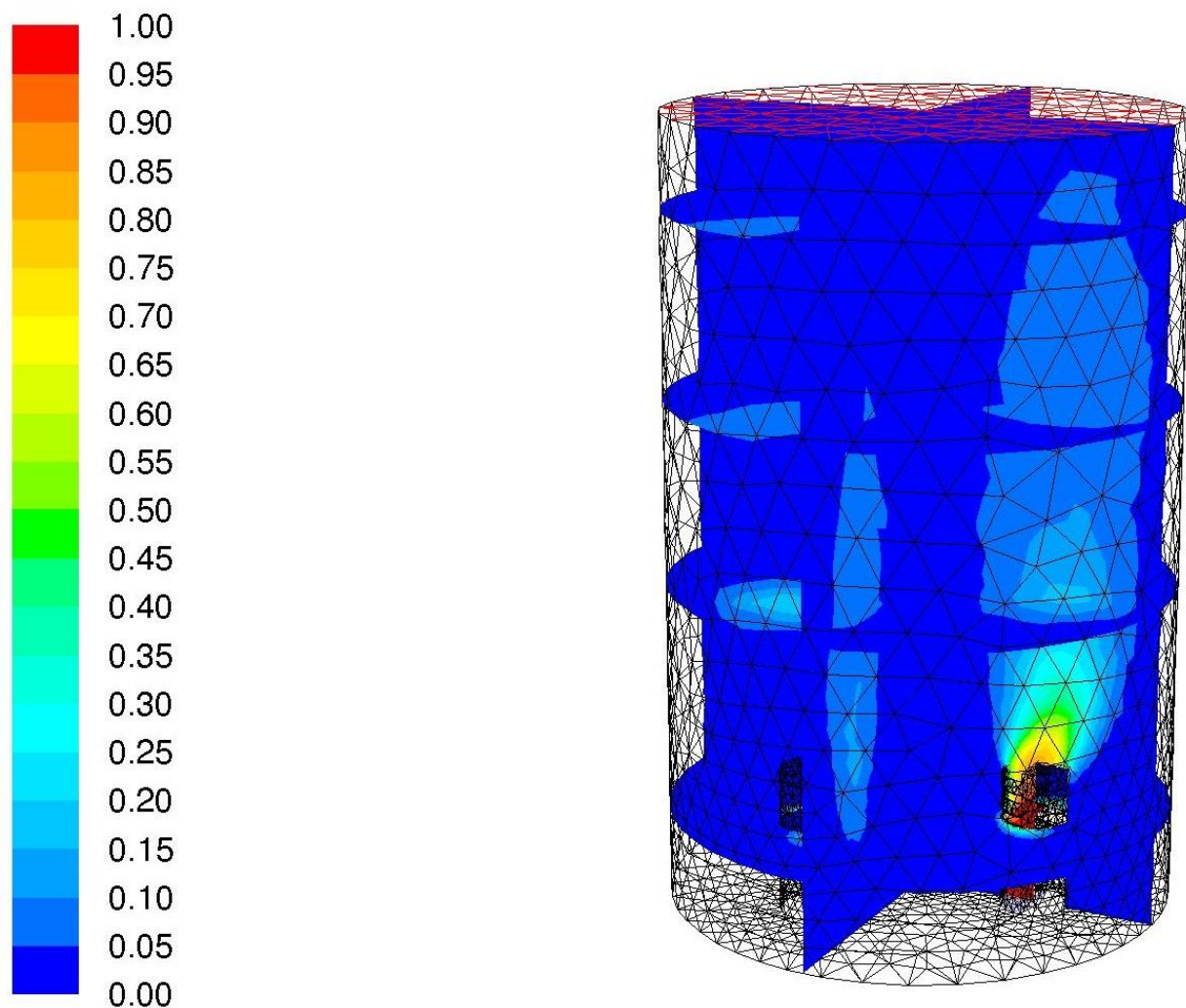


Рисунок 17 – Распределение массовой доли топлива в продольном сечении горелки (%)

КПД-бруто в данной конструкции будет выше, чем у прототипа, так как отсутствует недожог. По результатам численного моделирования видно, что, подводя топливо таким образом, мы получаем его оптимальное перемешивание с окислителем и как следствие полное его выгорание. О выгорании топлива можно судить по уменьшению его концентрации при прохождении через пористый слой. Максимальное количество топлива наблюдается на выходе из топливных эжекторов, а на выходе из горелочного устройства наблюдается его нулевая концентрация, что говорит о достигнутой цели по "зажатию" реакции в "теле" пористого слоя.

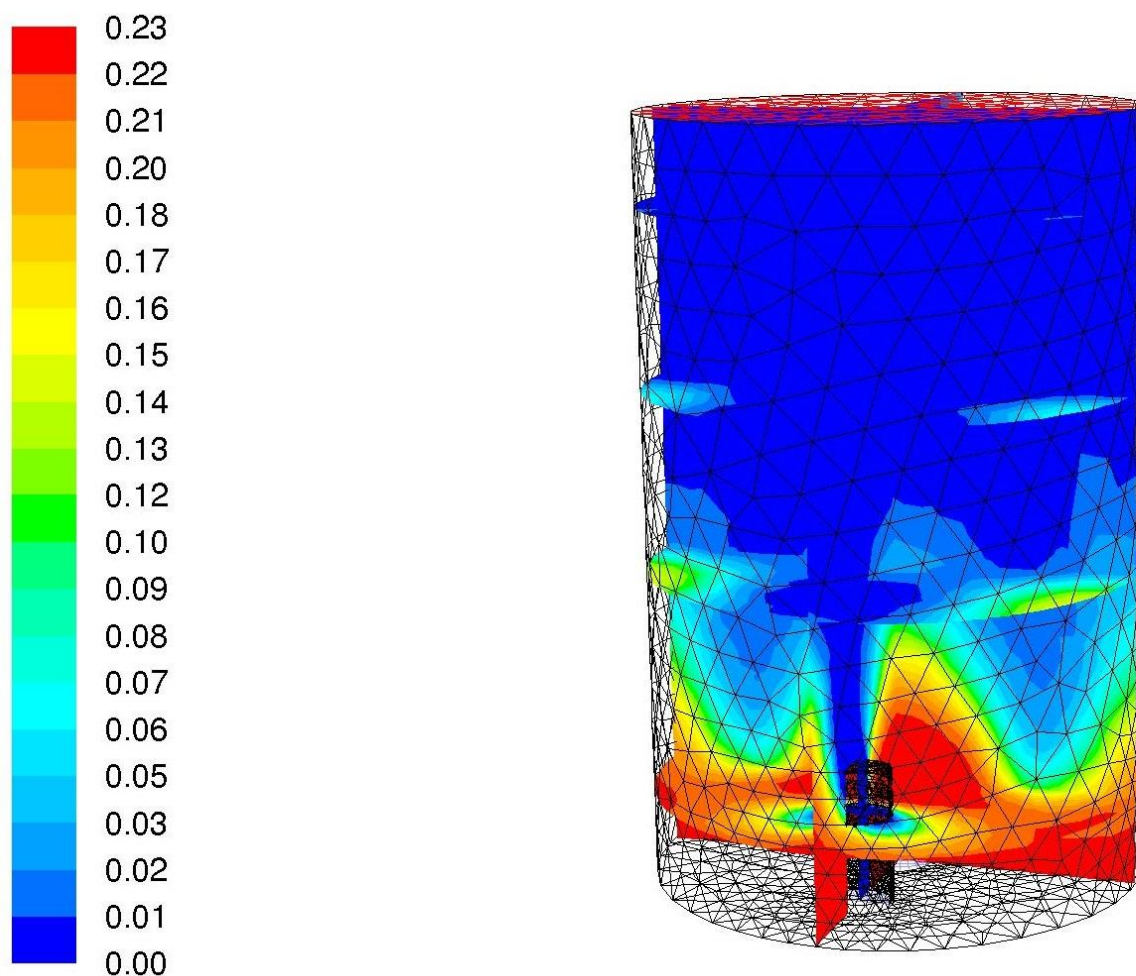


Рисунок 18 – Распределение массовой доли O_2 в продольном сечении горелки (%)

Из графика распределения массовой доли кислорода можно сделать вывод о том, что по мере прохождения воздуха через пористый слой, его концентрация уменьшается. В нижней части горелки, где располагается воздушный инжектор, наблюдается самая высокая концентрация O_2 . В верхней части горелочного устройства концентрация кислорода уменьшается до нуля что говорит о его полном выгорании и о том, что затраченная на его подачу в тело горелки энергия не расходовалась впустую, следовательно, КПД-нетто будет выше, чем у прототипа.

Анализируя график скорости химической реакции, можно сказать, что реакция распределена равномерно по объему пористого слоя и протекает

достаточно активно (рис. 19). Наличие одного топливного эжектора положительно влияет на аэродинамику горелочного устройства в целом.

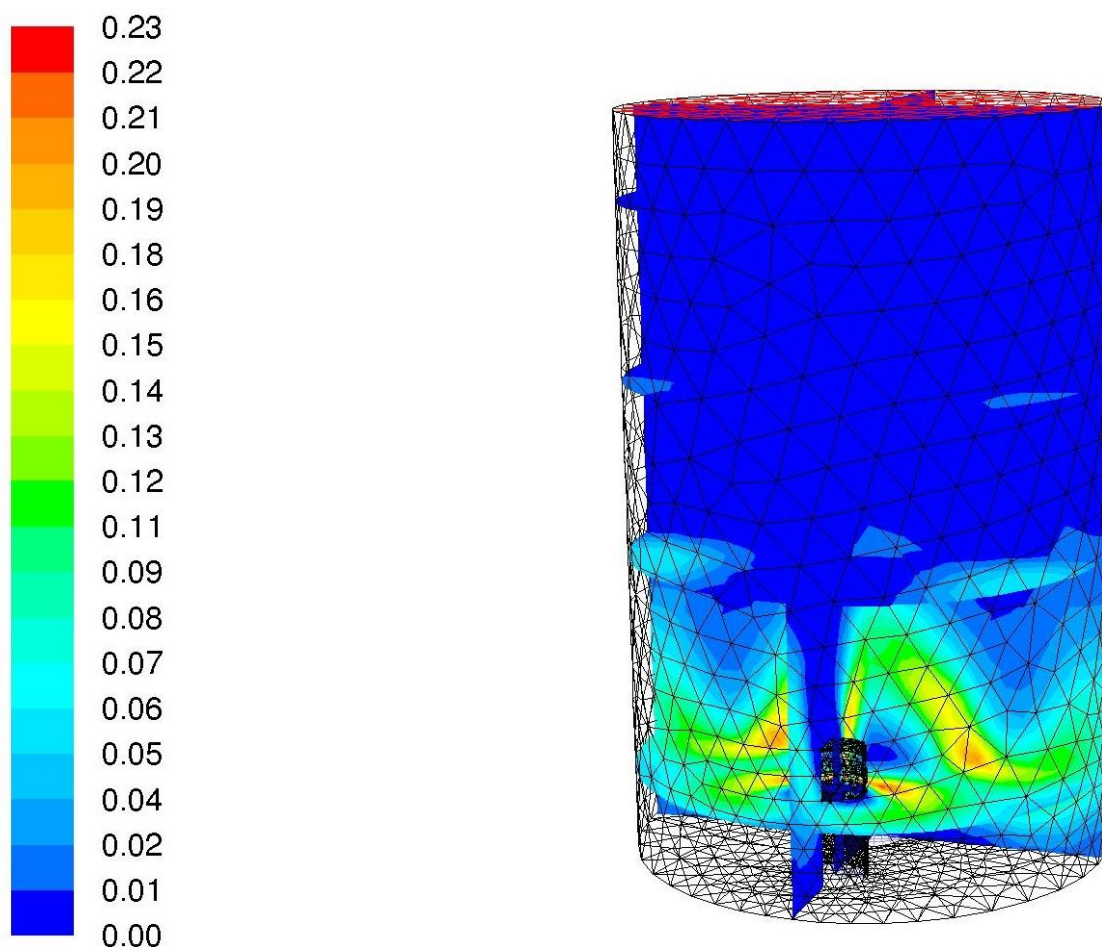


Рисунок 19 – Распределение скорости химической реакции в продольном сечении горелки ($\text{кмоль/м}^3 \cdot \text{с}$)

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что самая большая скорость химической реакции достигается в районе инжекторов. По мере продвижения вверх скорость химической реакции уменьшается, что обуславливается выгоранием компонентов реагирования. Однако, если рассмотреть поперечный разрез горелочного устройства (рис. 20), то можно сказать что, реакция распределена равномерно, и занимает все сечение горелки. Это еще раз подтверждает факт оптимального перемешивания сред.

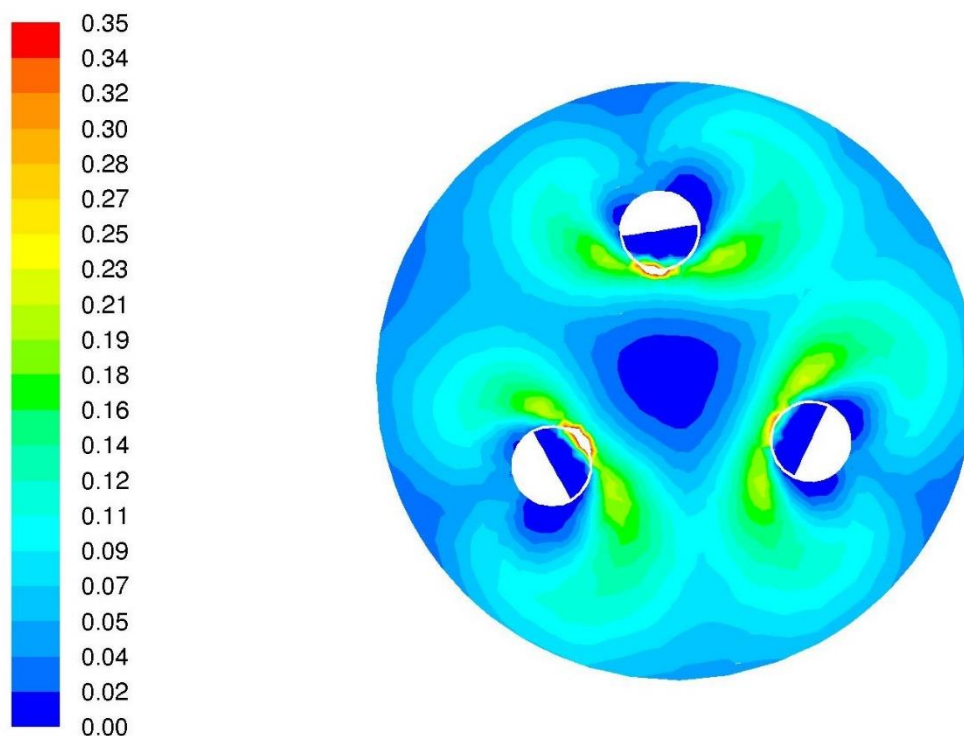


Рисунок 20 – Распределение скорости химической реакции в поперечном сечении горелки ($\text{кмоль}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$)

4.5 Краткие выводы

Можно отметить следующие основные технико-экономические показатели разработанной конструкции горелки и преимущества разработанной конструкции перед прототипом:

- при предложенной организации аэродинамики наблюдается полное выгорание топлива;
- наблюдается полное реагирование кислорода, подаваемого в объем горелочного устройства;
- прослеживается равномерное распределение температуры по всему объему пористой зоны. Снижение локальных тепловых нагрузок, что благоприятствует надежной работе устройства, и поэтому допускается его длительная эксплуатация при меньших затратах на ремонт;

– значительно ускоряется выгорание, благодаря существенной интенсификации смешения горючего с воздухом. Это позволяет горелочному устройству иметь достаточно небольшие габаритные размеры, что в свою очередь снижает металлоемкость устройства за счет сокращения его высоты;

– интенсивный теплоотвод от зоны горения приводит к снижению температуры в ядре горения, что, в свою очередь, является благоприятным фактором для снижения эмиссии термических оксидов азота.

ГЛАВА 7. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

7.1 Планирование работ

Планирование работы заключается в составлении перечня работ, необходимых для достижения поставленных задач, определение участков каждой работы, установление продолжительности работ в рабочих днях. В таблице 6 приведены состав и структура длительности научно-технических исследований и опытно-экспериментальных работ.

Таблица 6 – Состав и структура длительности научно-технических исследований и опытно-экспериментальных работ

Наименование этапов	Продолжительность этапов, %
А. Научно-теоретические исследования	
- подготовительный этап (обоснование методик)	12
- разработка теоретической части темы	15
- подготовка к исследованиям	4
- исследовательские работы	57
- внесение корректив в исследования	3
- выводы и предложения по теме	5
- завершающий этап	4
Итого	100
Б. Исследовательские работы	
- определение основных конструктивных данных	6
- создание сетки котла	20
- подготовка исходных данных для моделирования	5
- математическое моделирование аэродинамических процессов горелочного устройства	59
- анализ результатов моделирования	10
Итого	100

7.2 Расчет трудоемкости работ

Необходимо отчетливо распределить все этапы разработки во времени. Достаточно важной частью является определение последовательности работ, являющейся наиболее оптимальной с точки зрения минимальных затрат времени на осуществление всего комплекса работ.

Планирование работы заключается в следующем: составление перечня работ, необходимых для достижения поставленной задачи; определение участников работы; установление продолжительности работы в рабочих днях.

Для того чтобы выполнить НИР в срок, при наименьших затратах средств, составляется план, в котором рассчитывается поэтапная трудоемкость всех работ, назначается число участников работы по этапам, т.е. определяется фронт работы. Число участников должно быть максимально возможным по условиям выполнения того или иного этапа. С другой стороны, на каждом этапе должны участвовать только те работники, которые действительно необходимы для проведения данного этапа в соответствии со своей специализацией.

Для определения ожидаемого значения продолжительности работы применяют формулу, основанную на использовании двух оценок (табл. 7):

$$t_{ож} = \frac{(3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max})}{5},$$

где: t_{\min} – время, необходимое для выполнения работы при неблагоприятных условиях;

t_{\max} время, необходимое для выполнения работы при благоприятных условиях.

Таблица 7 – Трудоемкость работ

Код работ	Этапы работ	Продолжительность работы			Исполнитель
		t_{\max}	t_{\min}	$t_{ож}$	
1	Постановка задачи	1	1	1	Руководитель
2	Изучение литературы	8	5	6	Инженер
3	Анализ исходной информации	6	4	5	Руководитель, инженер
4	Предварительный технико-экономический анализ	9	7	8	Инженер
5	Выбор математической модели	12	8	10	Инженер, руководитель
6	Математическое моделирование физических процессов теплообмена	63	32	44	Инженер
7	Исследование влияния размещения эжекторов в рабочем объеме на выгорание топлива	15	6	10	Инженер
8	Исследование влияния наличия жесткого корпуса на рациональное использование компонентов сжигания	12	8	10	Инженер
9	Изучение аэродинамического сопротивления пористого слоя	20	12	15	Инженер
10	Анализ массового расхода воздуха и топлива для оптимизации сжигания	8	5	6	Инженер
11	Обработка результатов и основные выводы	15	9	11	Инженер
12	Исследование безопасности жизнедеятельности	6	4	5	Инженер
13	Оформление отчета	10	7	8	Инженер
	Итого	185	108	139	

7.3 Расчет затрат на научно-исследовательскую работу

7.3.1 Основные расходы на оборудование

Определение затрат по запланированным работам осуществляется в форме сметной плановой калькуляции, для расчета которой должны использоваться действующие прейскуранты основных цен. Данные расчеты представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Основные расходы на оборудование

Статьи затрат	Стоимость, руб.
Персональный компьютер	34000
Комплекующие ПЭВМ	10000
Принтер	3000
Стол	5000
Стул	1000
Шкаф	8000
Итого	61000

7.3.2 Заработная плата

Для расчета заработной платы приняты дневные ставки для руководителя и инженера в размере 172 руб. и 48 руб. соответственно. Расчет заработной платы производится на основании перечня работ и трудоемкости работ. Расчет заработной платы представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет по статье «Основная зарплата»

Этапы работы	Трудоемкость, чел/день		Суммарная основная заработная плата, руб.
	инженер	руководитель	
Постановка задачи	1	1	220
Изучение литературы	6		288
Анализ исходной информации	5	5	1100
Предварительный технико-экономический анализ	8		384
Выбор математической модели	10	10	2200
Математическое моделирование аэродинамических процессов горелочном устройстве	44		2112
Исследование влияния размещения эжекторов в рабочем объеме на выгорание топлива	10		480
Исследование влияния наличия жесткого корпуса на рациональное использование компонентов сжигания	10		480
Изучение аэродинамического сопротивления пористого слоя	15		720
Анализ массового расхода воздуха топлива для оптимизации сжигания	6		288
Обработка результатов и основные выводы	11		528
Исследование безопасности жизнедеятельности	5		240
Оформление отчета	8		384
Итого:	139	16	9424

7.3.3 Дополнительная заработная плата:

$$З_{\text{доп}} = 0,1 \cdot З_{\text{ос}} = 0,1 \cdot 9424 = 942,4 \text{ руб.}$$

7.3.4 Отчисления на социальные цели (единый социальный налог)

Единый социальный налог (ЕСН) учитывает отчисления в фонд пенсионного страхования, фонд социального страхования и фонд обязательного медицинского страхования (27 %):

$$\text{ЕСН} = 0,27 \cdot З_{\text{общ}} = 0,27 \cdot (З_{\text{всп}} + З_{\text{осн}}) = 0,27 \cdot (9424 + 942,4) = 2798,9 \text{ руб.}$$

7.3.5 Расходы на служебные командировки

Для получения действительных данных по конструкции прототипа исследования, топливных характеристик и отбора проб жидкого топлива необходима служебная командировка.

Суточные составляют 150 руб., суммарная продолжительность командировок 12 дней.

$$К = 150 \cdot 12 = 1800 \text{ руб.}$$

7.3.6 Расчет накладных расходов

К статье «Накладные расходы» относятся затраты на эксплуатацию и обслуживание. Размеры накладных расходов планируются в размере 60 % от фонда заработной платы.

$$НУ = 0,6 \cdot 9424 = 5654,4 \text{ руб.}$$

7.3.7 Издержки на услуги сторонних организаций

Затраты на услуги сторонних организаций включают в себя услуги транспортировки оборудования, затраты на поставку основных и вспомогательных материалов и прочие взаимосвязи. Затраты на услуги сторонних организаций принимаются и составляют 4500 руб.

7.3.8 Амортизация основных фондов и нематериальных активов (15 % от материальных затрат)

$$A=0,15 \cdot K_{\text{осн}}=0,15 \cdot 61000=9150 \text{ руб.}$$

где $K_{\text{осн}}$ – суммарная стоимость основных средств (технологическое и вспомогательное оборудование, производственный и хозяйственный инвентарь, 1500 руб./год).

7.3.9 Расходы на проведение научно-исследовательской работы

Смета данных расходов приведена в таблице 10. Рассчитываемая смета расходов включает затраты на приобретение необходимого оборудования, для проведения НИР и текущие расходы.

Таблица 10 – Смета расходов на проведение научно-исследовательской работы

Статьи расходов	Расходы, руб.
1	2
Оборудование	61000
Основная заработная плата	9424
Дополнительная заработная плата	942,4
Отчисление на социальное страхование	2798,9

Продолжение таблицы 10

1	2
Расходы на служебные командировки	1800
Накладные расходы	5654,4
Услуги сторонних организаций	4500
Амортизация	9150
Итого	95269,7

7.4 Расчет цены договора научно-исследовательской работы

7.4.1 Расчет плановых накоплений (прибыль)

$$\begin{aligned} \text{Пр} &= 0,2 \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{всп}} + \text{ЕСН} + \text{К} + \text{А} + \text{И}_{\text{орг}} + \text{НУ}) = \\ &= 0,2 \cdot (9424 + 942,4 + 2798,9 + 1800 + 5654,4 + 4500 + 9150) = 6853,9 \text{ руб.} \end{aligned}$$

7.4.2 Определение цены договора

$$\text{Ц} = \text{Пр} + \text{Р} = 6853,9 + 95269,7 = 102123,6 \text{ руб.}$$

7.5 Технико-экономическая оценка научно-исследовательской работы

В результате расчета определены плановые накопления, составляющие 6853,9 руб. Также произведен подсчет цены договора научно-исследовательской работы, составляющий 102123,6 руб. Общая смета затрат составила 95269,7 руб.

В данном разделе были проведены технико-экономические расчеты, определены затраты, необходимые для проведения научно технического исследования. Расчеты показывают, что математическое моделирование является эффективным и малозатратным способом исследования аэродинамических процессов горелочного устройства и позволяет еще на этапе проектирования заглянуть внутрь процессов и учесть все недостатки без затрат на построение прототипов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1 Долгов С.В., Савченко Е.К., Табакаев Р.Б., Заворин А.С. Заявка на патент №2016116683 от 27.04.16. Россия. МПК F24C5/00; F24H1/12 (2016.01). "Камера сгорания теплогенератора"; заяв.27.07.2016 г.

2 Савченко, Е.К. Анализ конструктивной схемы камеры горения с управляемым переходом в реализации аэродинамики от проточной до реверсивной [Электронный ресурс] = Analysis of the structural layout of the combustion chamber with a controlled transition to the implementation of the aerodynamics from the through flow to reverse / Е. К. Савченко, А. С. Заворин, С. А. Хаустов // Энергосбережение и водоподготовка. — 2015. — № 3 (95). — [С. 38-44].

3 Савченко, Е.К. Конструирование камер горения жаротрубных котлов с применением виртуального прототипирования [Электронный ресурс] / Е. К. Савченко, Е. И. Максимова, С. А. Хаустов; науч. рук. С. А. Хаустов //Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодёжного форума, 28 сентября - 2 октября 2015 г., г. Томск: в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2015. — Т. 1. — [С. 265-268].

4 Хаустов, С.А. Горение газообразного топлива в камере с управляемой траекторией факела [Электронный ресурс] / С. А. Хаустов, Е. К. Савченко, А. С. Заворин // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: материалы IX Всероссийской конференции с международным участием, Новосибирск, 16-18 ноября 2015 / Российская академия наук (РАН), Сибирское отделение (СО), Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе (ИТ). — Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2015. — [6 с.].