

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
«Применение численного моделирования процессов горения для диагностирования состояния поверхностей нагрева жаротрубного котла»

УДК 621.181.123:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Лисенков Артем Петрович		

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			

По разделу «Социальная ответственность»

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

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 решении инновационных профессиональных задач	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
P4	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
P5	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		
P6	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
P7	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, использовать методы решения задач оптимизации параметров в различных сложных системах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Р8	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
Р9	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
10	Способность и готовность к эффективному участию в программах освоения новой продукции и технологий, использованию элементов экономического анализа в практической деятельности на предприятиях и в организациях, готовность следовать их корпоративной культуре	Требования ФГОС ВО (ПК-9,10), Критерий 5 АИОР (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) 130403 «Энергетическое машиностроение»

Кафедра Парогенераторостроения и парогенераторных установок

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5BM4Б	Лисенкову Артему Петровичу

Тема работы:

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ЖАРОТРУБНОГО КОТЛА	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	716/с от 03.02.2016

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 Технико-экономическое обоснование 2 Объект и методология исследования 3 Результаты численного исследования 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 5 Социальная ответственность Заключение

Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова С.Н.
Социальная ответственность	Романцов И.И.
Иностранный язык	Собинова Л.А.
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
5ВМ4Б	Лисенков Артем Петрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5BM4Б	Лисенков Артем Петрович

Институт	Энергетический	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 теплообменного аппарата, который предназначен для подогревания газа.</i>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

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
5BM4Б	Лисенков А.П.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4Б	Лисенков Артем Петрович

Институт	Энергетический	Кафедра	ПГС и ПГУ
Уровень образования	магистратура	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>Рассматриваемая рабочая зона представляет собой аудиторию № 224 четвёртого корпуса НИ ТПУ. В частности, на ПК выполнялись: моделирование процессов горения; измерение данных; их обработка. В помещении существует опасность поражения электрическим током и возникновения возгорания. Помимо этого, на находящихся в таком помещении людей могут оказывать влияние вредные факторы, такие как некачественное освещение, шум, электромагнитное излучение, запылённость и ненадлежащее состояние микроклимата.</i>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – 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). 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты)	<i>Основными вредными факторами при работе в рассматриваемой рабочей зоне являются факторы, связанные с качеством освещения, уровнем шума, состоянием микроклимата, запылённостью и интенсивностью излучения. Необходимо определить нормативные значения данных факторов для данного помещения. Предложить мероприятия по уменьшению воздействия вредных факторов и привести возможные средства защиты.</i> <i>Основными опасными факторами для данного помещения являются возможность поражения электрическим током и возникновение пожара. Источниками возникновения данных факторов является работающее электрооборудование и неправильное обращение с ним. Необходимо рассмотреть средства и мероприятия по организации безопасной работы с ним, а также средства защиты (например, месторасположение и порядок использования средств пожаротушения).</i>
2. Экологическая безопасность: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);	<i>Рассматриваемая рабочая зона не оказывает существенного воздействия на атмосферу, гидросферу и литосферу. Срок эксплуатации комплектующих данного оборудования достаточно велик. По истечении</i>

– 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.	срока службы часть передается на восстановление, а часть поступает в отходы.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС при разработке и 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.	Наиболее возможными ЧС в рассматриваемой рабочей зоне являются поражение людей электрическим током и возникновение пожара. Для их предупреждения необходимо строгое соблюдение правил безопасности и норм, определяющих порядок работы с оборудованием. Персонал и студенты для допуска к работе должны изучить технику безопасности и уметь правильно действовать в случае ЧС. Рассмотреть средства, определяющие действия при возникновении ЧС и ликвидации их последствий (например, план эвакуации и средства пожаротушения).
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.	Определить порядок и организацию работы в рассматриваемом помещении, обеспечивающие безопасные и комфортные условия труда, с соблюдением санитарных и технологических норм

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Лисенков Артем Петрович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 104 страниц, 53 источников, 36 рисунков, 1 приложения.

Ключевые слова: математическое моделирование, жаротрубный котел, надежность работы, поверхность нагрева, гидрогазодинамические процессы.

Объектом исследования являются стальные водогрейные жаротрубные котлы малой мощности.

Цель работы – изучение влияния протекающих аэродинамических и гидродинамических процессов в рабочих трактах жаротрубных котлов на их надежность для дальнейшей разработки рекомендаций по диагностике и продлению срока службы.

В данной работе были рассмотрены гидрогазодинамические процессы в поверхностях нагрева жаротрубных котлов, их влияние на надежность работы и ресурс котлоагрегатов.

В процессе исследования проводились серии экспериментов с помощью математического моделирования.

В результате исследования было выявлено влияние гидрогазодинамических процессов на надежность работы поверхностей нагрева жаротрубных котлов.

Экономическая эффективность работы: данная работа имеет важное значение, так как в целом направлена на решение актуальной стратегической задачи – обеспечение надежности и долговечности энергетического оборудования.

Оглавление

Введение.....	13
Глава 1. Техничко-экономическое обоснование.....	16
1.1 Обзор практики диагностики котлов с применением численного моделирования.....	18
1.2 Постановка задач исследования	22
Глава 2. Объект и методология исследования.....	23
2.1 Объект исследования.....	23
2.2 Исходные данные для расчета.....	26
2.3 Дискретизация расчетной области.....	29
2.4 Физико-математическая постановка задачи	29
Глава 3. Результаты численного исследования.....	39
3.1 Математическое моделирования гидродинамического тракта жаротрубного котла Турботем–500М.....	39
3.2 Математическое моделирования газодинамического тракта жаротрубного котла Турботем–500.....	51
3.3 Математическое моделирования гидродинамического тракта жаротрубного котла Vitoplex 300	61
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	65
4.1 Планирование работ	65
4.2 Расчет трудоемкости работ.....	66
4.3 Расчет затрат на научно–исследовательскую работу.....	68
4.4 Расчет цены договора научно–исследовательской работы.....	70
4.5 Техничко–экономическая оценка научно–исследовательской работы	71
5 Социальная ответственность.....	72

5.1 Промышленная санитария	72
5.2 Система вентиляции	73
5.3 Освещение	73
5.4 Микроклимат помещения	74
5.5 Источники шума	75
5.6 Электробезопасность при работе на ПЭВМ	75
5.7 Воздействие электромагнитного поля на оператора ПЭВМ.....	77
5.8 Пожарная безопасность.....	77
5.9 Региональная безопасность.....	79
5.10 Организация рабочего места оператора ПЭВМ	80
Заключение.....	82
Список использованных источников.....	85
Приложение А (обязательное).....	91

Введение

В настоящее время в малой энергетике получают широкое распространение автономные системы теплоснабжения на базе жаротрубных котлов, что объясняется простотой их изготовления, меньшими металлоемкостью и габаритными размерами на единицу мощности, и как следствие – более выгодной, в сравнении с водотрубными котлоагрегатами, стоимостью. Кроме того, эксплуатационные расходы у котлов такого типа ниже, чем у водотрубных аналогов, поскольку применяются менее мощные насосы, которых достаточно для преодоления низких гидравлических сопротивлений водяного тракта жаротрубных котлов. Монтаж этих котлов упрощается, так как они поставляются единым блоком в теплоизоляции, а их лучшая ремонтпригодность обуславливается простым доступом к поверхностям нагрева [1].

Несмотря на все свои неоспоримые преимущества перед водотрубными котлами, жаротрубные, при этом, требуют более бережного отношения при проектировании, изготовлении, монтаже и эксплуатации.

Некорректно подобранное оборудование котельного агрегата вследствие ошибки при составлении проектной документации; дефекты и неисправности аппаратных узлов; нарушение правил технической эксплуатации и режима работы обслуживающим персоналом – основные и самые частые причины аварий на жаротрубных котлах. Эти факторы ведут к снижению надежности работы, как отдельных поверхностей нагрева, так и котла в целом, а иногда и к выходу из строя всей котельной установки [2]. Подобные недостатки прямым образом указывают на сложность газо- и гидродинамических процессов, протекающих в трактах котлоагрегатов жаротрубного типа.

Такое положение дел косвенно указывает на фактические недоработки расчетных методик конструирования [3], поэтому проектирование, изготовление, монтаж и эксплуатация создает ряд проблем, решить которые можно исключительно подробным изучением процессов гидро- и газодинамики

в рабочем объеме вышедшего из строя оборудования. Проведение экспериментов по воссозданию аварийных режимов работы требует больших капиталовложений, так как не всегда имеется возможность визуально-инструментальных наблюдений процессов, протекающих непосредственно внутри котла [4]. Вследствие чего на первый план выходят прогнозирование аварийных режимов работы и разработка наиболее эффективных конструктивных решений, при которых организация работы жаротрубного котла обеспечивается минимальными сопротивлениями рабочих трактов, оптимальными характеристиками горения и экологичностью работы. При этом, проводя оценку качества жаротрубного котла, необходимо также учитывать применяемые материалы и технологии изготовления [1].

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что, проблемы прогнозирования ресурса поверхностей нагрева, связанные с подробным изучением процессов гидро- и газодинамики в рабочем объеме водогрейных жаротрубных котлов, являются весьма актуальными на сегодняшний день в теоретическом и практическом значении.

Целью данной работы является изучение влияния протекающих аэродинамических и гидродинамических процессов в рабочих трактах жаротрубных котлов на их надежность для дальнейшей разработки рекомендаций по диагностике и продлению срока службы.

Объект исследования является стальные водогрейные жаротрубные котлы малой мощности.

Предметом исследования являются газодинамические и гидродинамические процессы в трактах водогрейных жаротрубных котлов малой мощности.

Новизна работы заключается в том, что автором:

– впервые в РФ проведены детальные исследования процессов газо- и гидродинамики применительно к методикам диагностирования (определения причин аварии) стальных водогрейных жаротрубных котлов малой мощности;

– выявлено наличие локальных газо- и гидродинамических структур в трактах жаротрубных котлов, влияющих на их надежность и ресурс;

– полученные результаты работы дополняют представления о влиянии ряда режимных параметров на интегральные характеристики надежности и ресурс.

Диссертационная работа в целом направлена на решение актуальной стратегической задачи – обеспечение надежности и долговечности энергетического оборудования.

Полученные посредством математического моделирования результаты исследования могут применяться при проектировании, модернизации и реконструкции водогрейных котлов малой мощности. Результаты и выводы исследования направлены на применение в практике проектных организаций и проектных бюро котлостроительных заводов, в частности, ООО «Малая генерация».

Глава 1. Технико-экономическое обоснование

В условиях постоянного развития экономики России происходит вполне логичный и обоснованный рост выработки энергии. Прослеживается явный подъем потребности энергии для промышленных нужд как одного из факторов стабильно развивающейся экономики [5].

Следует отметить, что значительные объемы нового строительства, а также привлечение к этому малых предприятий и частных инвесторов и соответствующее формирование инвестиционной политики определили применение на многих строящихся в России объектах применение автономных источников теплоснабжения малой мощности на базе жаротрубных котлов [3].

Такие отопительные и водоснабжающие системы позволяют регулировать подачу тепла независимо от жилищно-коммунальных компаний, и промышленных предприятий. Кроме того, подобное оборудование демонстрирует высокую надежность функционирования и хорошие теплотехнические показатели. Коэффициент полезного действия этих котлов, как правило, достигает 90–95 %, при этом они обладают лучшей ремонтпригодностью и стоят значительно дешевле своих водотрубных аналогов [1, 3].

Малая себестоимость; низкие эксплуатационные затраты; короткие сроки начала эксплуатации; работа оборудования в автоматическом режиме, благодаря чему не требуется постоянный контроль оператора – являются отличительной особенностью котельных подобного типа.

Однако, несмотря на свои многочисленные преимущества, практика расчета таких котлов обладает одним существенным недостатком: отсутствие четкой нормативно-расчетной базы. Расчет котлов малой мощности по нормативному методу [6] имеет недопустимо большую погрешность в виду того, что метод разрабатывался для проектирования крупных энергетических котельных агрегатов [7]. В связи с этим жаротрубные котлы требуют периодической визуально-инструментальной оценки технического состояния и

эксплуатационного ресурса. Оценка технического состояния производится в следующих случаях: работа выше номинальной мощности; излишние циклы и / или изменение нагрузки; количество остановов и пусков больше, чем проектное; чрезмерные повреждения; и большое количество повреждений аналогичных устройств [8].

Объем исследования состояния котла диктуется объемом данных, необходимых для оценки срока его службы. Первый уровень обследования включает визуальный контроль и, при необходимости, минимальный объем неразрушающего контроля. Второй уровень в дополнение к визуальной инспекции включает в себя неразрушающий контроль, возможно, с небольшим количеством проб материала (образцов труб). Третий уровень заключается во взятии проб для обширного лабораторного анализа, инженерных исследований, таких как анализ напряжений и анализ производительности котла, а также местные экспериментальные проверки, такие как измерение напряжения с помощью тензодатчиков и т.д. [9]. Проведение этих трех уровней обследования достаточно трудоемкий процесс, который требует определенных финансовых затрат.

Наличие расчетной методики прогнозирования ресурса позволит исключить множество причин аварий жаротрубных котлов, выявляя недостатки конструкции еще на стадии проектирования и изготовления. Помимо этого, отпадет необходимость в достаточно капиталоемких и ресурсоемких реконструкциях котельных агрегатов [6]. Однако вследствие отсутствия единой методики расчета для решения задач конструирования жаротрубных котлов все чаще применяется метод численного моделирования с помощью пакета апробированных прикладных программ [10].

1.1 Обзор практики диагностики котлов с применением численного моделирования

В зарубежной практике проблема отсутствия единой стандартизированной методики расчета конструкции жаротрубных котлов так же является актуальной. Имеющиеся средства конструирования (например, [11]) не позволяют оптимизировать аэродинамические и гидродинамические процессы, происходящие в поверхностях нагрева котла. Поэтому определить эффективность работы в отсутствие известных экспериментальных значений критериев подобия и модельных характеристик для конструктивных схем жаротрубных котлов с полным учетом всех параметров и процессов представляется возможным только по результатам расчета полной картины течения среды в его газовом и водяном трактах.

Трудозатраты на конструирование могут быть снижены за счет применения метода конечных элементов. Основные преимущества этого метода численного расчета по сравнению с инженерными методами расчета [6, 11, 12, 13, 14] заключается в возможности получения почти реалистичной картины деформаций и напряжений, надежной оценки при прогнозировании поведения конструкции котла в процессе эксплуатации.

Численный анализ все чаще применяется на этапе конструирования котла для определения прочностных характеристик. Так, метод конечных элементов как один из видов численного моделирования помогает определить общие потери от обмуровки и труб котла-утилизатора [15]. Кроме этого, математическое моделирование вполне удачно применяется для расчета напряжений дымовых труб при упругопластической деформации [16], а так же для определения причин и профилактик трещин в конструкции трубной доски котла [17, 18].

В [19] применение метода конечных элементов в проектировании котлов иллюстрируется на примере жаротрубного котла с обратной камерой. Анализ показал, что для снижения стоимости изготовления в новом котле может быть

установлена гладкая труба топочной камеры той же толщины, что и оребренная. Анализ показал, что высокая концентрация напряжений имела место в мембранных стенках в углах котлов на высоте опорной стойки, а также в части опорной стойки, которые не охвачены проектными нормами. Для того, чтобы решить проблему деформации в критических местах, предлагается применение [19].

Авторы [19] пришли к выводу, что большое влияние на тепловые напряжения конструкции жаротрубного котла оказывает геометрия жаровой трубы. Тепловые напряжения в гофрированных трубах значительно уменьшаются с увеличением глубины гофры. Деформация трубных решеток в осевом направлении труб топки являются самыми большими для модели с гладкими трубами топки. Очевидно, что гофрированные трубы выполняют компенсацию этих деформаций [20]. Из этого следует вывод о том, что гофрированная труба топочной камеры должна быть установлена в котлах большой мощности. Установка обычной гладкой трубы в таких котлах может вызвать большие пластические деформации котла. Кроме того авторы [19, 20, 21] сходятся во мнении, что при проектировании элементов котла влияние термических напряжений учитывается не надлежащим образом, так как температура дилатации некоторых компонентов котла может привести к большим пластическим деформациям, а также к повышению динамической прочности.

Помимо этапа конструирования, численное моделирование широко применяется для диагностирования состояния жаротрубных котлов как для определения эффекта трещин в цилиндрических оболочках котлов [22], так и для анализа механики разрушения жаровой трубы (рис. 1, 2) [23]. Так, например, в [24] необходимость учета термических напряжений при эксплуатации котла была выявлена при численном анализе прочности конструкции котла с помощью метода конечных элементов [24].



Рисунок 1 – Отдулина топки жаротрубного котла



Рисунок 2 – Разрыв сварного шва и подтеки в результате попадания
теплоносителя в газовый объем

Важное место при эксплуатации жаротрубных котлов занимает система водоподготовки. Поэтому появляется необходимость определения влияния накипи на термические напряжения структуры жаротрубных котлов. Значительный масштаб поражений может привести к образованию трещин в сварных соединениях топочной камеры и трубной пластины камеры первого хода [25].

Также применение численного моделирования нашло широкое применение в сфере реконструкции. Благодаря анализу, полученному посредством применения математического моделирования, выявляются особенности работы жаротрубного котла и рекомендации по повышению его эффективности и надежности. Так, термомеханический анализ жаротрубного котла выявил напряжения на стыке топки и поворотной камеры [26]. Термомеханический анализ парового котла меньшей мощности показал, что вместо гофрированных труб топки, в нем могут быть установлены гладкие трубы той же толщины [27]. При этом, его надежность работы остается неизменной, но за счет более простой конструкции стоимость такого котла значительно снижается.

На основе произведенного обзора практики диагностики котлов можно сделать вывод, что несмотря на широкое распространение численного моделирования для диагностирования состояния поверхностей нагрева жаротрубного котла за рубежом, в РФ эти методы зачастую применения не находят. Кроме того, авторы рассмотренных в обзоре работ не учитывают особенности протекающих внутри котла процессов.

В настоящей магистерской диссертации аварийные режимы работы неисправности и недостатки конструкции котельного агрегата рассматриваются с применением современных методов численного моделирования. При диагностировании неисправностей жаротрубных котлов сделан акцент на исследование аэродинамических и гидродинамических процессов в их трактах.

1.2 Постановка задач исследования

На основании технико-экономического анализа можно заключить, что практика применения математического моделирования для оценки надежности и ресурса жаротрубных котлов заключается как в возможности получения почти реалистичной картины деформаций и напряжений, так и прогнозирования поведения конструкции котла при эксплуатации. В большинстве случаев полная гидрогазодинамическая картина аварийных режимов работы не воссоздается, деформации и напряжения рассчитываются на основании усредненных удельных значений давления и тепловых характеристик, определенных по результатам грубой инженерной оценки.

Из этого следует, что для детальной и качественной диагностики работы жаротрубного котла необходимо воссоздавать полную картину аварийных режимов работы с учетом гидрогазодинамических процессов.

Исходя из приведенного обзора проблем диагностирования работы жаротрубных котлов, современных направлений применения математического моделирования, и учитывая цель работы, сформулированы следующие задачи исследования:

- определить характеристики рабочих сред, пригодные для диагностирования неисправностей в работе жаротрубных котлов;
- изучить влияние аэродинамических и гидродинамических процессов в трактах жаротрубных котлов на надежность их работы на основе численного моделирования;
- на основании полученных результатов выявить недостатки в конструкции котельных агрегатов, влияющие на надежность котельного оборудования;
- разработать рекомендации по реконструкции, диагностике и увеличению ресурса жаротрубных котлов.

Глава 2. Объект и методология исследования

Процесс математического моделирования условно разделяют на несколько этапов. На первом этапе, на основании анализа теоретических закономерностей, происходит постановка задачи, определение объекта и основных целей исследования. Так же задаются признаки, по которым происходит изучение объекта исследования и их оптимизация. От правильности задания всех исходных данных зависит результативность и достоверность расчета [28].

2.1 Объект исследования

В качестве объекта исследований по аэродинамическому и гидродинамическому тракту принят стальной водогрейный жаротрубный котел «Турботерм–500», спроектированный ООО «Рэмэкс» на номинальную мощность 500 кВт, как наиболее распространенный в отечественной энергетике [29]. Данный котел предназначен для работы в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения. Выпускаются для работы при допустимом рабочем давлении теплоносителя 0,6 МПа и с допустимой температурой подачи воды до 115 °С. На рис. 3 представлен общий вид котла, на рис. 4 – схема движения газов в котле.

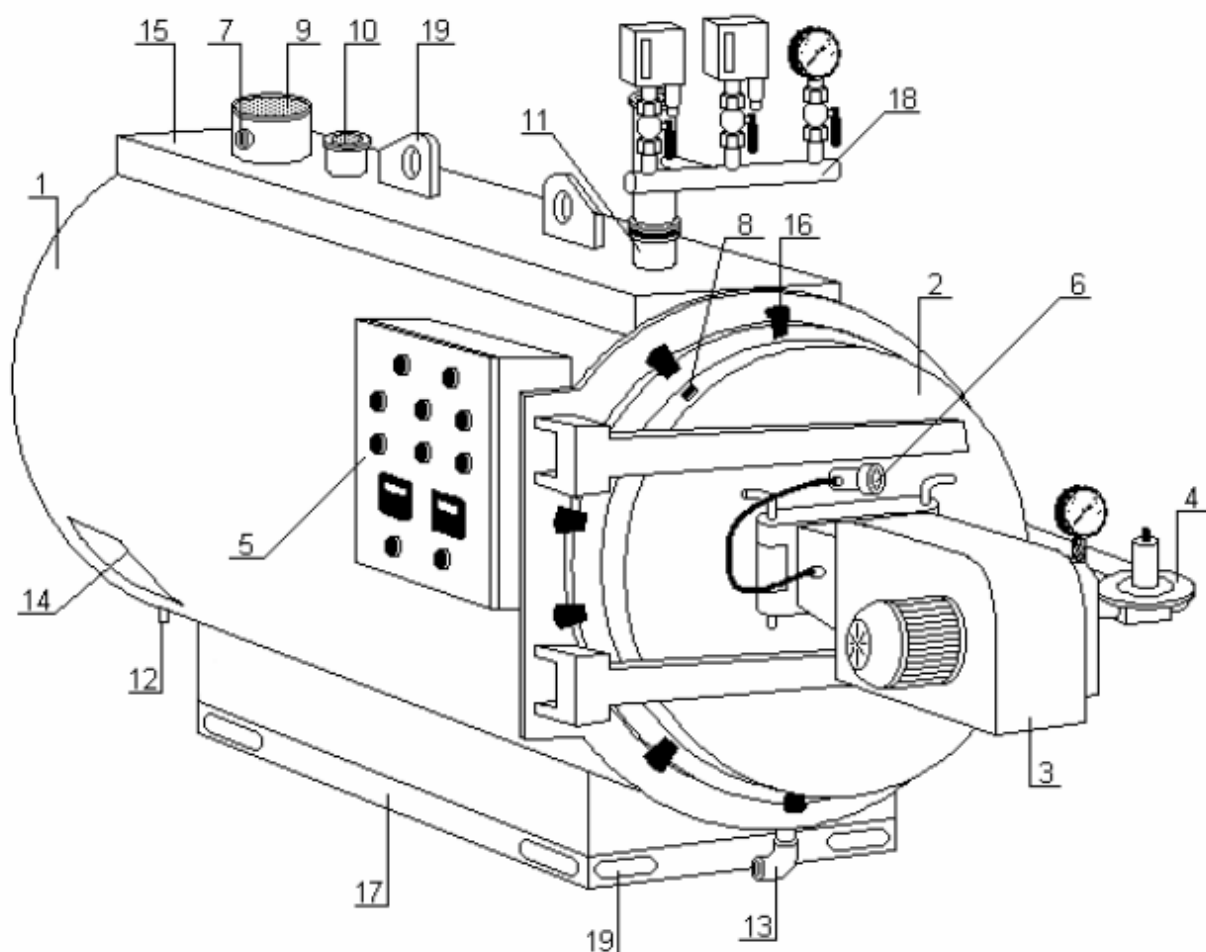


Рисунок 3 – Общий вид котлоагрегата Турботерм 500 [29]

1 – корпус котла; 2 – фронтальная крышка котла; 3 – газогорелочное устройство; 4 – газовая рампа; 5 – щит управления, сигнализации и аварийных блокировок; 6 – смотровое окно; 7 – муфта для установки датчика температуры; 8 – штуцер для измерения разряжения в топке котла; 9 – газоход; 10 – патрубок входа воды в котёл; 11 – патрубок выхода воды из котла; 12 – патрубок слива конденсата из каминной части котла; 13 – дренажный патрубок котловой воды; 14 – люк прочистки камина; 15 – площадка для обслуживания и монтажа; 16 – зажимы передней крышки; 17 – рама котла; 18 – группа безопасности котла; 19 – такелажные петли

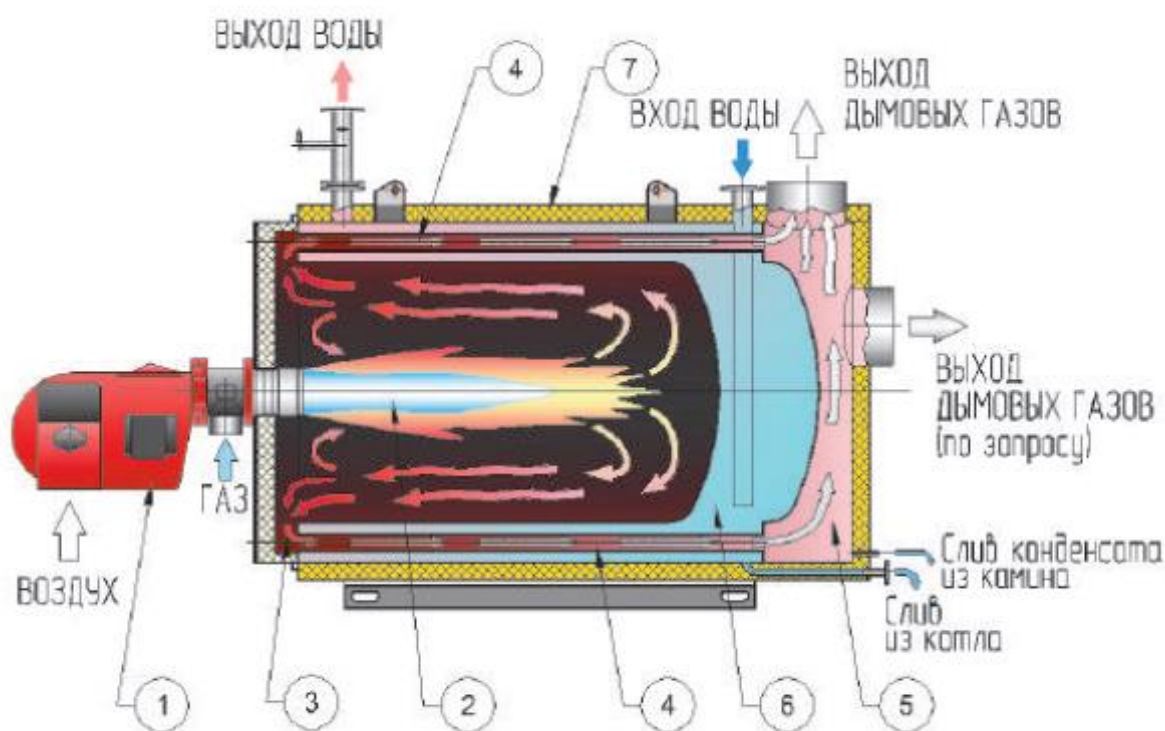


Рисунок 4 – Схема движения газов в котле Турботерм-500

1 – горелка котла; 2 – жаровая труба (топка); 3 – фронтальная крышка;
4 – дымогарные трубы; 5 – камин (камера сбора дымовых газов); 6 – водяной
объем; 7 – теплоизоляция и кожух корпуса

Так же, в качестве объекта исследований по гидродинамическому тракту выбран низкотемпературный стальной водогрейный жаротрубный котел Vitoplex 300 как пример котлоагрегата со сложным конструктивным исполнением водяного тракта. Кроме того универсальность котлов данной серии обеспечивается благодаря широкому диапазону мощности, они могут быть включены в тепловую схему любого назначения. На рис. 5 представлен общий вид котла Vitoplex 300.

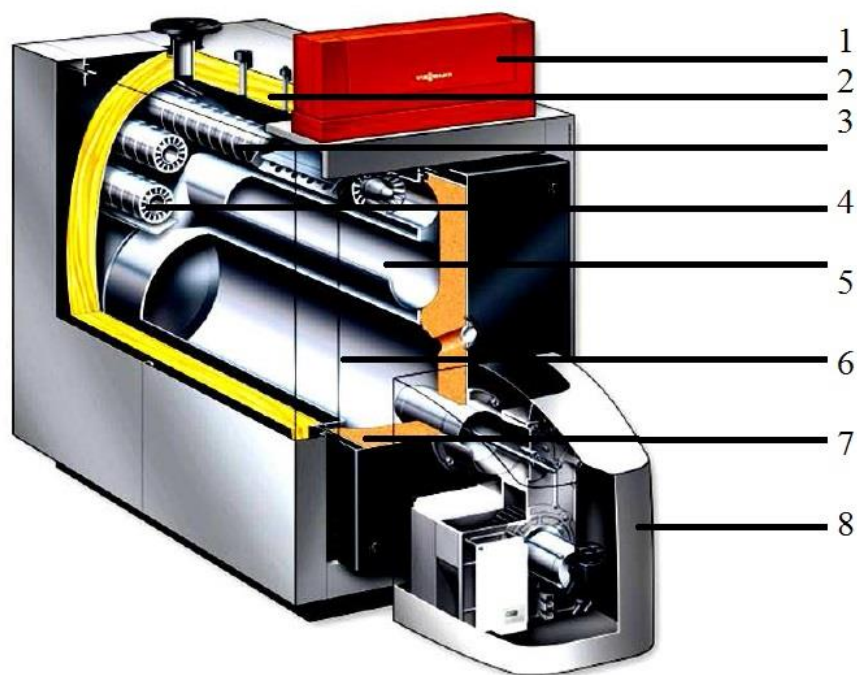


Рисунок 5 – Общий вид котла Vitoplex 300 [30]

1 – контроллер Vitotronic; 2 – теплоизоляция котла; 3 – многослойные конвективные теплообменные поверхности; 4 – жаровые трубы третьего хода; 5 – реверсивные трубы второго хода; 6 – камера сгорания; 7 – теплоизоляция двери котла; 8 – горелочное устройство

2.2 Исходные данные для расчета

В работе проводится ряд численных экспериментов с различными исходными данными для расчета.

Исследования гидродинамического трака котла Турботерм-500 проводилось в 4 этапа. Были приняты следующие исходные данные:

- а) рабочая среда – жидкая вода (100 % H_2O);
- б) температура ее подачи 60 °C [29];
- в) массовый расход теплоносителя при:
 - 1) нормальном режиме работы 2,65 кг/с [29];
 - 2) уменьшении расхода на 25 % – 1,9875 кг/с;
 - 3) уменьшении расхода на 50 % – 1,325 кг/с;
 - 4) уменьшении расхода на 75% – 0,6625 кг/с;

г) неравномерный тепловой поток через жаровую трубу рассчитан в п. 3.2.

Для математического исследования газодинамического тракта жаротрубного котла Турботерм–500 принимались следующие исходные данные:

– в качестве сжигаемого топлива использовался чистый метан, т.к. это допустимое упрощение [10];

– массовые доли в воздухе: кислорода – 23 %, азот – 77 %;

– теоретически необходимый для полного сгорания объем воздуха $9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [6];

– коэффициент избытка воздуха 1,03 [6];

– массовый расход топливовоздушной смеси 0,2 кг/с (принимается по [6]);

– температура смеси топлива и воздуха 20 °С (равна температуре воздуха в помещении котельной);

– средняя температура теплоносителя 92,5 °С [29].

Другие технические характеристики котла Турботерм-500 приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические характеристики котла Турботерм - 500 [29]

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
1	2	3
Номинальная теплопроизводительность	МВт	0,5
Коэффициент полезного действия	%	92
Температура уходящих газов	°С	170
Температура воды на входе в котел, минимальная	°С	60
Температура воды на выходе из котла предельная	°С	115
Температура воды на выходе из котла номинальная	°С	до 105

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Рабочее давление воды	МПа	0,6
Гидравлическое давление	кПа	8–11
Противодавление в топке	МПа	0,00025
Объем воды в котле	м ³	1,12

Исходные данные для расчета гидродинамики водогрейного жаротрубного котла Vitoplex 300:

- теплоноситель – жидкая вода (100 % H₂O);
- температура его подачи 70 °С [30];
- средняя температура в выходном патрубке, согласно [30], составит 95 °С;
- неравномерный тепловой поток через стены труб первого хода (47000 Вт/м²), второго хода (31140 Вт/м²), третьего хода (18850 Вт/м²) дымовых газов принимался по нормативному уравнению теплообмена [6].

Основные технические характеристики котла Vitoplex 300 приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Технические характеристики котла Vitoplex 300 [30]

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
1	2	3
Номинальная тепловая мощность	МВт	0,3
Нормативный КПД	%	96
Температура уходящих газов	°С	160

Продолжение табл. 2

1	2	3
Рабочее давление воды	МПа	0,4
Гидравлическое давление	кПа	8–11
Аэродинамическое сопротивление	Па	300

2.3 Дискретизация расчетной области

Вторым этапом является формирование математической модели объекта. При этом необходимо создавать модель, которая позволит получить самый рациональный и логичный результат, а не наиболее сложную и похожую на объект исследования, так как большая конкретизация или укрупнение лишь помешают построению модели и достаточно сильно снизят скорость проведения численного моделирования.

В начале, построенная геометрическая модель посредством Ansys Workbench преобразовывается в расчетную структурированную тетрагональную сетку с линейным размером стороны ячейки, заданным в диапазоне $1,3 \cdot 10^{-8} - 1,56 \cdot 10^{-7}$, позволяющим производить численное моделирование с высокой производительностью и приемлемой точностью. Затем расчетные сетки импортируются в расчетный модуль универсального пакета прикладных программ Ansys Fluent.

На рис. 6 представлена расчетная сетка для исследования гидродинамического тракта водогрейного жаротрубного котла Турботерм-500.

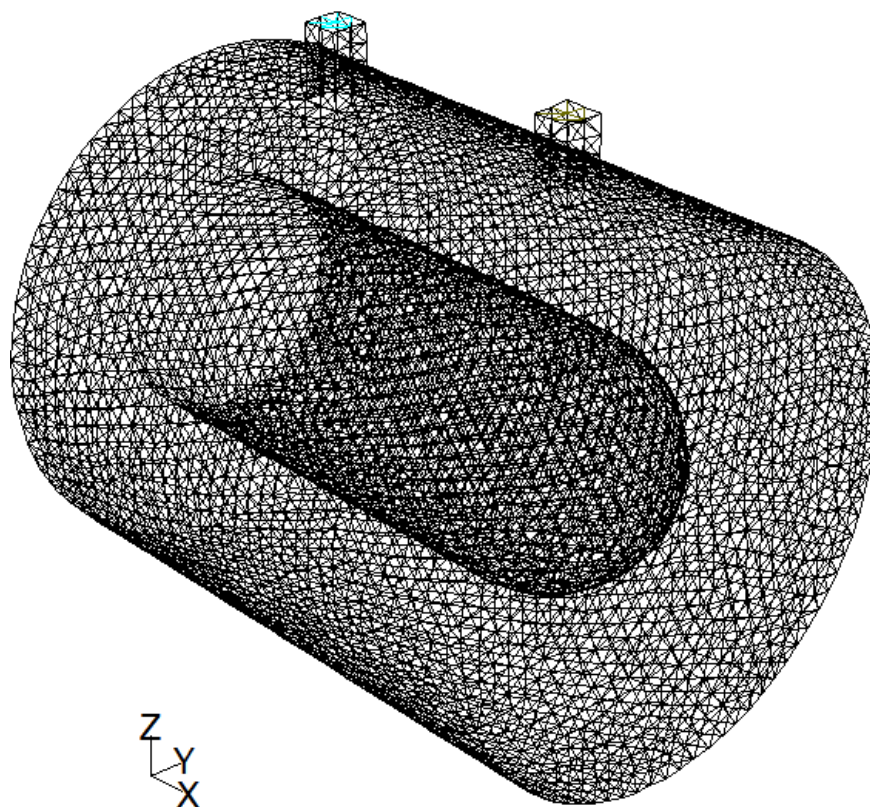


Рисунок 6 – Расчетная сетка для исследования гидродинамического тракта котла Турботерм-500

Сетка для моделирования гидродинамического тракта котла Турботерм-500 включает:

- 128222 ячеек;
- 24433 узлов;
- 262509 отдельных поверхностей.

В табл. 3 приведено распределение ячеек по зонам.

Таблица 3 – Распределение ячеек котла Турботерм-500 по зонам для гидродинамики

Число ячеек (шт.) и тип	Зона
1	2
128222 (четырехгранные)	Водяной объем
250459 (треугольные)	Внутренние поверхности

Продолжение табл. 3

1	2
8963 (треугольные)	Обогреваемые поверхности стен
2991 (треугольные)	Поверхности стен, покрытые изоляцией
48 (треугольные)	Выход воды из котельного агрегата
48 (треугольные)	Вход воды в котельный агрегат

На рис. 7 приведена импортированная универсального пакета прикладных программ Ansys Fluent расчетная сетка для исследования газоздушного тракта котлоагрегата Турботерм-500.

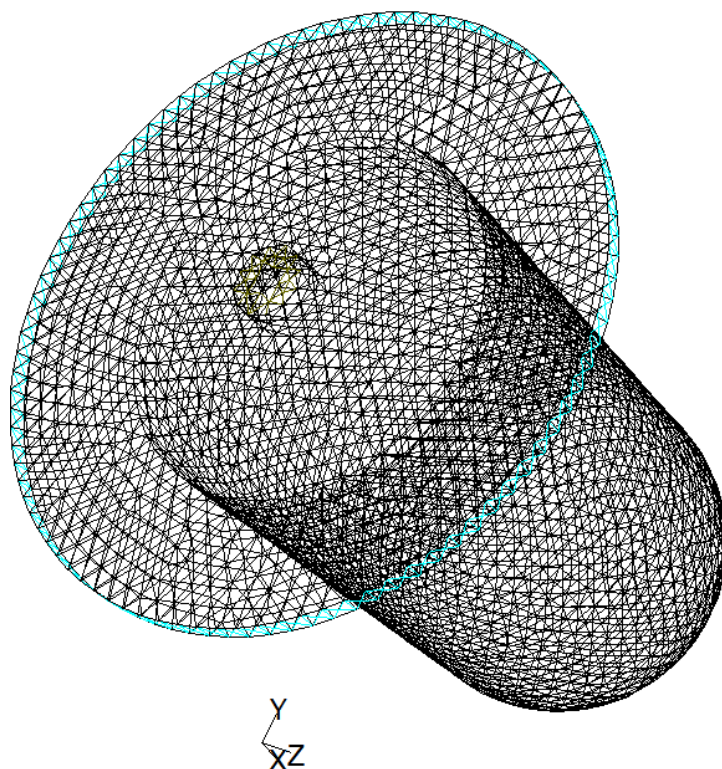


Рисунок 7 – Расчетная сетка для исследования газоздушного тракта котла Турботерм-500

Расчетная сетка для исследования газозвдушного тракта котла Турботерм-500 включает:

- 7738055 ячеек;
- 1327892 узлов;
- 1729 отдельных поверхностей.

В табл. 4 приведено распределение ячеек по зонам.

Таблица 4 – Распределение ячеек котла Турботерм-500 по зонам для газодинамики

Число ячеек (шт.) и тип	Зона
7738055 (шестигранные)	Топочный объем
15407751 (шестигранные)	Внутренние поверхности
126216 (треугольные)	Обогреваемые поверхности стен
178 (треугольные)	Вход топовоздушной смеси в топочный объем
10324 (треугольные)	Выход дымовых газов из топочной камеры котлоагрегата

Расчетная сетка котла Vitoplex 300 для исследования гидродинамического тракта приведена на рис. 8.

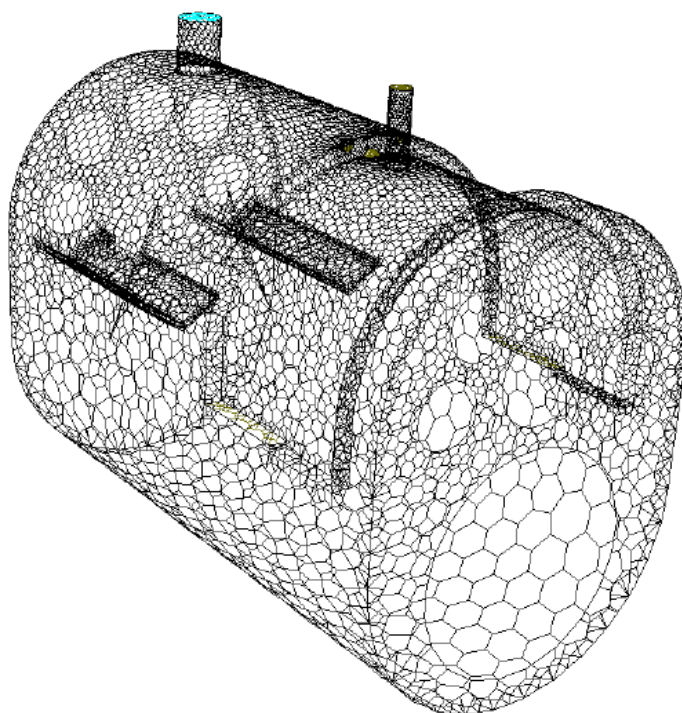


Рисунок 8 – Расчетная сетка котла Vitoplex 300

Расчетная сетка котла Vitoplex 300 состоит из 124798 ячеек, содержит 28162 узлов и имеет 264872 отдельных поверхностей. В табл. 5 приведено распределение ячеек по зонам.

Таблица 5 – Распределение ячеек котла Vitoplex 300 по зонам

Число ячеек (шт.) и тип	Зона
1	2
124798 (шестигранные)	Водяной объем
234320 (шестигранные)	Внутренние поверхности
15568 (треугольные)	Обогреваемые поверхности стен
10549 (треугольные)	Стены топочной камеры
2552 (треугольные)	Стены конвективных труб третьего хода
1490 (треугольные)	Стены конвективной трубы второго хода

Продолжение табл. 5

1	2
265 (треугольные)	Уголки
66 (треугольные)	Выход воды из котлоагрегата
62 (треугольные)	Вход воды в котел

Пробные расчеты с использованием сеток разной топологии и числа ячеек показали, что такое количество структурных элементов является допустимым для проведения исследования, т.к. обеспечивает приемлемую точность расчета при сохранении высокой скорости его проведения.

2.4 Физико-математическая постановка задачи

На третьем этапе происходит исследование построенной математической модели, которое начинается с выбора метода ее решения. Затем задаются граничные и начальные условия математической модели в соответствии с реальными условиями работы.

В настоящей диссертационной работе методом конечных элементов моделируются следующие процессы и явления: горение топливовоздушной смеси, турбулентность в реагирующей среде, конвективный и лучистый теплообмен. Окисление топлива происходило необратимо и в два этапа: $2\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O}$; $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$. Моделирование газовой и жидкой фаз производится в приближении Эйлера. В таком случае для кратности уравнения записываются только для одной координаты, и математическая модель включает в себя (интегрирование производится по индексам i) [31]:

– неразрывности

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0;$$

– движения

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta \left[\rho k + (\mu + \mu_\tau) \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \right],$$

$$j = 1, 2, 3;$$

– энергии

$$\frac{\partial \rho U_i c T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left[\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_{tT}}{Pr_t} \right] c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_p^n J - \frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i};$$

– состояния

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \left[\frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{C_{19}H_{30}}}{M_{C_{19}H_{30}}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]},$$

где U_i – составляющие трехмерного вектора скорости течения;

ρ – плотность смеси;

p – давление смеси;

T – температура смеси;

c – удельная теплоемкость смеси;

μ – динамическая вязкость;

C_j – концентрация j -ого компонента смеси;

M_j – молекулярный вес j -ого компонента смеси;

J – стехиометрический коэффициент в уравнении скорости реакции горения газообразного топлива [31].

Для описания турбулентных характеристик газа использовалась двухпараметрическая standard k-ε модель турбулентности Лаундера и Сполдинга, которая хорошо зарекомендовала себя в задачах с различного рода, в том числе и с высокой кривизной линий тока. Данная модель так же справедлива для интенсивного турбулентного течения, т.е. при высоких значениях критерия подобия Рейнольдса (Re), когда турбулентные структуры пренебрежимо мало зависят от вязкости потока [31]:

$$\frac{\partial \rho k U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{1,0} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + C - \rho \varepsilon,$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{1,3} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + 1,44 G \frac{\varepsilon}{k} - 1,92 \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

$$\mu_t = 0,09 \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$G = \left[\mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j},$$

где k – кинетическая энергия турбулентности;

ε – скорость диссипации кинетической энергии;

δ_{ij} – символ Кронекера;

μ_t – турбулентная вязкость;

q_i^{rad} – составляющие трехмерного вектора теплового потока излучением.

Теплообмен излучением в общем балансе энергий в камерах сгорания играет важную роль. При численном исследовании радиационного теплопереноса в излучающих, поглощающих и рассеивающих средах, таких как топочные камеры, используется интегрально-дифференциальное уравнение интенсивного термического излучения. Для аппроксимативного решения данного уравнения в магистерской работе применяется метод сферических гармоник (P1 приближение). Его хорошая совместимость с конечноразностными методами обуславливает использование подобного подхода при моделировании термического излучения в топочной камере. Математическая постановка процесса радиационного переноса тепла включает в себя следующие дифференциальные уравнения в рамках P1 приближения метода сферических гармоник для серой излучающей, поглощающей и рассеивающей среды

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{3k_b} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) = -a(4\sigma T^4 - H);$$

$$\frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i} = a(4\sigma T^4 - H),$$

где H – пространственная плотность падающего излучения, Вт/м²;

$k_e = a$ – коэффициент ослабления среды, 1/м;

a – коэффициент поглощения, 1/м;

σ – постоянная Стефана–Больцмана [32].

Модель Сполдинга (Eddy-Break-Up – EBU), предложенная в [33], является одной из часто используемых моделей для математического моделирования протекающей в турбулентном потоке химической реакции. Скорость химической реакции, согласно этой модели, пропорциональна интенсивности турбулентного перемешивания. Однако воздействие температуры потока на скорость протекающих реакций в EBU модели не учитывается. Это делает невозможным моделирование протекания течения с переходными режимами горения, определяющими условия существования пламени.

Однако, применение модифицированной модели, основанной на использовании совместно кинетической модели и модели Сполдинга, позволяет учесть различные режимы течения потока.

Кинетическая скорость реакции определяется [34]

$$\bar{w}_{kin} = A_K \bar{\rho}^2 \tilde{c}_f \tilde{c}_{ox} \exp \left[-E / (R_{un} \tilde{T}) \right],$$

где A_K – постоянный коэффициент, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$;

E – энергия активации химической реакции, Дж/моль;

R_{un} – универсальная газовая постоянная.

Скорость турбулентного горения, согласно EBU модели, вычисляется по формуле

$$\bar{w}_t = A_{EBU} \bar{\rho} (\varepsilon / \kappa) \min \{ \tilde{c}_f, \tilde{c}_{ox} / \nu \},$$

где A_{EBU} – коэффициент модели.

При использовании модели EBU совместно с методом крупных вихрей отношение ε / κ вычисляется так [35, 36]

$$\varepsilon / \kappa = \sqrt{2 \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}};$$

тогда формула скорости горения турбулентного потока имеет вид

$$\bar{w}_t = A_{EBU} \bar{\rho} |\tilde{S}| \min \{ \tilde{c}_f, \tilde{c}_{ox} / \nu \}.$$

Для учета зависимости скорости реакции от температуры потока формула видоизменяется следующим образом

$$\bar{\dot{w}}_t = A_{EBU} B_{EBU} \bar{\rho} |\tilde{S}| \min \{ \tilde{c}_f, \tilde{c}_{ox} / \nu \} ,$$

где B_{EBU} — коэффициент, зависящий от температуры.

$$B_{EBU} = 6,386 \cdot 10^3 \exp[-E/(R_{un}\tilde{T})].$$

Вид связи B_{EBU} и температуры выбраны по аналогии с законом Аррениуса. Коэффициент B_{EBU} имеет значения в диапазоне от нуля до единицы. Свое максимальное значение ($B_{EBU}^{max}=1$) он принимает при $\tilde{T}_{max} \approx 2100$ К (т.е. при наибольшей температуре горения). Соответственно, при температурах, близких к наибольшим, значения полученных по двум последним формулам переменных, становятся фактически одинаковыми. Коэффициент $6,386 \cdot 10^3$ в выражении для B_{EBU} найден из соотношения $B_{EBU}^{max} / \exp[-E/(R_{un}\tilde{T})] = 6,386 \cdot 10^3$. При уменьшении температуры коэффициент B_{EBU} также начинает уменьшаться, обуславливая тем самым зависимость скорости реакции от температуры [37].

Окончательно, после выявления турбулентной и кинетической составляющих скоростей горения, скорость реакции вычисляется по следующей формуле [36]:

$$\bar{\dot{w}} = \sqrt{\bar{\dot{w}}_{kin}^2 + \bar{\dot{w}}_t^2} .$$

Применение этой формулы дает возможность смоделировать плавный переход как от ламинарного к турбулентному режиму горения при увеличении интенсивности турбулентного перемешивания, так и наоборот, от турбулентного режима к ламинарному, соответственно, при уменьшении интенсивности. Таким образом, предложенная модель является универсальной для расчета течений реагирующего газа в широком диапазоне значений чисел Рейнольдса [39].

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 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 табл. 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)	20
– разработка теоретической части темы	12
– подготовка к исследованиям	8
– исследовательские работы	44
– внесение корректив в исследования	4
– выводы и предложения по теме	8
– завершающий этап	4
Итого	100
Б. Исследовательские работы	
– определение основных конструктивных данных	5
– создание сетки теплообменника	12
– подготовка исходных данных для моделирования	4
– математическое моделирование процессов горения	69
– анализ результатов моделирования	10
Итого	100

Календарный график работ представлен на рис. 35.

Этап	Начало	Окончание
Научно-теоретические исследования		
Подготовительный этап	01.09.2015	24.09.2015
Разработка теоретической части темы	25.09.2015	09.10.2015
Подготовка к исследованиям	10.10.2015	20.10.2015
Исследовательские работы	21.10.2015	07.12.2015
Внесение коррективов в исследования	07.12.2015	11.12.2015
Выводы и предложения по теме	12.12.2015	22.12.2015
Завершающий этап	22.12.2015	28.12.2015
Исследовательские работы		
Определение основных конструктивных данных	11.01.2016	18.01.2016
Создание сетки теплообменника	19.01.2016	05.02.2016
Подготовка исходных данных для моделирования	06.02.2016	12.02.2016
Математическое моделирование процессов горения	13.02.2016	19.05.2016
Анализ результатов моделирования	20.05.2016	31.05.2016

Рисунок 35 – Календарный график работ

4.2 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, составлен план, в котором рассчитывается поэтапная трудоемкость 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:

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

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

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

В табл. 7 приведена общая трудоемкость работ.

Таблица 7 – Трудоемкость работ

Этапы работ	Продолжительность работы			Исполнитель
	$t_{\max}$	$t_{\min}$	$t_{ож}$	
1	2	3	4	5
Постановка задачи	1	1	1	Руководитель
Изучение литературы	8	5	7	Инженер
Анализ исходной информации	6	4	5	Руководитель, инженер
Предварительный технико– экономический анализ	9	7	10	Инженер
Выбор математической модели	12	8	10	Инженер, руководитель
Математическое моделирование процессов горения	63	32	40	Инженер
Исследование влияния различных условий работы	30	15	28	Инженер

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5
Изучение влияния параметров рабочих тел	20	12	15	Инженер
Обработка результатов и основные выводы	15	9	11	Инженер
Исследование безопасности жизнедеятельности	6	4	5	Инженер
Оформление отчета	10	7	8	Инженер
Итого	185	108	140	

4.3 Расчет затрат на научно–исследовательскую работу

4.3.1 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 табл. 8.

Таблица 8 – Материальные затраты

Статьи затрат	Стоимость, руб.
Персональный компьютер	35000
Комплектующие ПЭВМ	17000
Принтер	4000
Итого	56000

4.3.2 Заработная плата

Для расчета заработной платы приняты дневные ставки для руководителя и инженера в размере 150 и 50 руб. соответственно. Расчет заработной платы производится на основании перечня работ и трудоемкости работ. Расчет зарплаты представлен в табл. 9.

Таблица 9 – Расчет по статье «Основная зарплата»

Этапы работы	Трудоемкость, чел/день		Суммарная основная зарботная плата, руб.
	инженер	руководитель	
Постановка задачи	1	1	200
Изучение литературы	7		350
Анализ исходной информации	5	5	2000
Предварительный технико– экономический анализ	10		500
Выбор математической модели	10	10	4000
Математическое моделирование процессов горения	40		2000
Исследование влияния различных условий работы	28		1400
Изучение влияния параметров рабочих тел	15		750
Обработка результатов и основные выводы	11		550
Исследование безопасности жизнедеятельности	5		250
Оформление отчета	8		400
Итого:	140	16	12400

4.3.3 Дополнительная заработная плата:

$$З_{\text{доп}} = 0,1 \cdot З_{\text{ос}} = 0,1 \cdot 12400 = 1240 \text{ руб.}$$

4.3.4 Отчисления на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды учитывают отчисления в фонд пенсионного страхования, фонд социального страхования и фонд обязательного медицинского страхования (27 %):

$$ОСН = 0,27 \cdot З_{общ} = 0,27 \cdot (З_{всп} + З_{осн}) = 0,27 \cdot (12400 + 1240) = 3682,8 \text{ руб.}$$

4.3.5 Расчет накладных расходов

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

$$НУ = 0,6 \cdot 12400 = 7440 \text{ руб.}$$

4.3.6 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 6000 руб.

4.3.7 Расходы на проведение научно–исследовательской работы

Смета данных расходов приведена в табл. 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.
Материальные затраты	56000
Основная заработная плата	12400
Дополнительная заработная плата	1240
Отчисление социальные нужды	3682,8
Накладные расходы	7440
Услуги сторонних организаций	6000
Итого	86762,8

4.4 Расчет цены договора научно–исследовательской работы

4.4.1 Расчет плановых накоплений (прибыль)

$$\begin{aligned} \text{Пр} &= 0,2 \cdot (З_{осн} + З_{всп} + ОСН + А + И_{орг} + НУ) = \\ &= 0,2 \cdot (12400 + 1240 + 3682,8 + 7440 + 6000) = 6152,56 \text{ руб.} \end{aligned}$$

4.4.2 Определение цены договора

$$Ц = Пр + Р = 6152,56 + 86762,8 = 92915,36 \text{ руб.}$$

4.5 Технико-экономическая оценка научно-исследовательской работы

В результате расчета определены плановые накопления, составляющие 6152,56 руб. Также произведен подсчет цены договора научно-исследовательской работы, составляющий 92915,36 руб. Общая стоимость затрат составила 86762,8 рублей.

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 физических процессов теплообмена; позволяет еще на этапе проектирования заглянуть внутрь процессов и учесть все недостатки без затрат на построение прототипов.