

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
«Проект котельной установки паропроизводительностью 50 т/ч для сжигания отходов лесопереработки с целью выработки диагностических эксплуатационных показателей»

УДК 621.182.2-66.001.13:674.002.68.

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Андреев Иван Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель кафедры ПГС и ПГУ	Долгих Александр Юрьевич	-		

**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		
P1	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
P2	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
P3	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
P4	Способность и готовность проявлять в инновационной деятельности глубокие	Требования ФГОС ВО (ОК-1; ОПК-1), Критерий 5

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте	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
<b>Профессиональные компетенции</b>		
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
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	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-4,5,6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4, п. 1.6.), согласованный с требованиями

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	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	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 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 13.03.03 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  
 (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4Б	Андрееву Ивану Владимировичу

Тема работы:

<b>ПРОЕКТ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С КОТЛОМ ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 50 Т/Ч ДЛЯ СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ ЛЕСОПЕРЕРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ ВЫРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ</b>
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам, экологический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Объект проектирования – котельная установка с паровым котлом паропроизводительностью 50 т/ч.</li> <li>2. Параметры пара: <math>P_{п.п.} = 3,9 \text{ МПа}</math>, <math>t_{п.п.} = 440^\circ\text{C}</math>.</li> <li>3. Температура питательной воды – <math>t_{п.в.} = 145^\circ\text{C}</math>.</li> <li>4. Давление в барабане – <math>P_b = 4,3 \text{ МПа}</math>.</li> <li>5. Основное сжигаемое топливо – отходы лесопереработки.</li> <li>6. Способ сжигания топлива: слоевое - факельное, топка в газоплотном исполнении.</li> <li>7. Величина непрерывной продувки – <math>p = 1 \%</math>.</li> <li>8. За прототип принять котел – Е-50-3,9-440 (БМ-35РФ) (ООО «БЕЛЭНЕРГОМАШ-БЦЭМ»).</li> </ol>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выявления достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Введение (Актуальность работы. Постановка цели и задач работы.);</li> <li>2. Аналитический обзор проблемы (Состояние вопроса, обзор литературы);</li> <li>3. Описание объекта исследования, методов и средств.</li> <li>4. Обоснование выбора методов и средств исследований, принятых исходных данных, предлагаемых технических решений и методов;</li> <li>5. Проектные решения по компоновке поверхностей нагрева парового котла;</li> <li>6. Тепловой расчет;</li> <li>7. Моделирование эксплуатационных показателей работы котла;</li> <li>8. Анализ полученных результатов работы;</li> <li>9. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. (Экономические расчеты и технико-экономические показатели);</li> <li>10. Социальная ответственность;</li> <li>11. Раздел работы на иностранном языке (по выбору);</li> <li>12. Заключение, в том числе на иностранном языке.</li> </ol>
--	---

<p><b>Перечень графического материала (формата А1)</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Чертежи общего вида котельной установки – 1-2 листа;</li> <li>2. Полученные результаты моделирования(иллюстрации) – 2-3 листа;</li> </ol>
---	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

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) и заключение переводится на иностранный язык.


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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	Ф.И.О	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель кафедры ПГС и ПГУ	Долгих Александр Юрьевич	—		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	Ф.И.О	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Андреев Иван Владимирович		

**«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ВМ4Б	Андрееву Ивану Владимировичу

<b>Институт</b>	<b>ЭНИН</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ПГС и ПГУ</b>
Уровень образования	Магистратур	Направление/специальность	Энергетическое машиностроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость строительства и монтажа оборудования
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Не рассматривались
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Не рассматривались

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	Проведен анализ расходов предприятия за год.
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	Не рассматривались
3. Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР	Не рассматривались
4. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	Проведен расчет окупаемости предприятия
5. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков.	Проведена оценка рентабельности проекта.

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

**Заданию принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5ВМ4Б	Андреев И.В.		

## «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ВМ4Б	Андрееву Ивану Владимировичу

<b>Институт</b>	<b>ЭНИН</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Энергетическое машиностроение</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление/специальность</b>	ПГС и ПГУ

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Котельная установка с котлом паропроизводительностью 50 т/ч для сжигания отходов лесопереработки.</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Производственная безопасность</b>	
<p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты)</li> </ul>	<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. Повышенный уровень вибрации.</p> <p>4. Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны.</p> <p>5. Недостаточная освещенность рабочей зоны.</p> <p>6. Микроклимат.</p> <p>1. Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов.</p> <p>2. Повышенный уровень статического электричества.</p> <p>3. Повышенное барометрическое давление в рабочей зоне и его резкое изменение.</p> <p>4. Движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования.</p>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</p>

<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p>Возгорание крытого склада древесных отходов.</p>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Организация рабочего места машиниста котельной.</p>

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Андреев Иван Владимирович		

## Реферат

Диссертация состоит из 86 страниц, 22 рисунков, 12 таблиц, 39 источников, семи приложений.

Ключевые слова: поверочный расчет, предтопок, топочная камера, природный газ, древесные отходы, слоевое сжигание, факельное сжигание, численное моделирование, математическое моделирование.

Объектом работы является многотопливная котельная установка паропроизводительностью 50 т/ч для сжигания отходов лесоперерабатывающего комбината.

Цель работы – определение эксплуатационных характеристик работы котельной установки паропроизводительностью 50 т/ч при сжигании отходов лесопереработки.

В процессе работы проводились поверочные расчеты котельной установки при работе на древесных отходах и природном газе. Проводился анализ полученных результатов.

В результате работы были получены характеристики на выходе из топки и в ядре горения при различных режимах работы, также с помощью математического моделирования получена общая картина процессов горения в топочном объеме котла, получены параметры аэродинамики, температуры дымовых газов и массовый состав топлива и окислителя.

## Сокращения

1. ТЭЦ – теплоэлектроцентраль.
2. КДО – кородревесные отходы.
3. ДО – древесные отходы.
4. ЛПК – лесоперерабатывающий комплекс.
5. ЦБК – целлюлозно-бумажный комбинат.
6. ТБО – твердые бытовые отходы.
7. КПП – конвективный пароперегреватель.
8. ВЭК – водяной экономайзер.
9. ВП – воздухоподогреватель.
10. РПП – радиационный пароперегреватель.
11. ЭК – энергетический комплекс.
12. ЛПК – лесоперерабатывающий комбинат.
13. МДФ – (мелко-дисперсионная фракция) – древесноволокнистая плита
14. ДСП – древесно-стружечная плита.
15. ЧЦР – чешуйчатой цепной решетки.
16. ТШУ – твердое шлакоудаление.
17. ЖШУ – жидкое шлакоудаление.
18. DPM – Discrete Phase Modeling
19. ПГ – парогенератор
20. ПДК – предельно допустимая концентрация.
21. ПДУ – предельно допустимый уровень.
22. ЧС – чрезвычайная ситуация.

## Содержание

Введение.....	12
1 Аналитический обзор проблемы использования кородревесных отходов .....	14
2 Анализ и обоснование выбора проектных решений .....	18
2.1 Классификация топочных устройств .....	19
2.2 Камерные (факельные) топки для сжигания пылевидного топлива .....	20
2.4 Немеханизированные топочные устройства .....	23
2.5 Полумеханические слоевые топки .....	24
2.6 Механизированные слоевые топки .....	25
2.7 Обоснование выбранной схемы сжигания .....	27
3 Описание объекта исследования .....	29
3.1 Камерная топка котельной установки .....	30
3.2 Слойовой предтопок котельной установки .....	32
4 Методы и средства исследования котельной установки.....	34
5 Поверочные расчеты котельной установки Е-50-3,9-440ДГ .....	39
5.1 Поверочный расчет на природном газе .....	39
5.2 Поверочный расчет на древесных отходах .....	40
6 Моделирование эксплуатационных показателей работы котла.....	41
6.1 Моделирование котельной установки на природном газе .....	41
6.2 Моделирование котельной установки на древесных отходах.....	47
7 Анализ полученных результатов .....	52
8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	56
8.1 Хозяйственные цели научного исследования .....	56
8.2 Расчет капитальных вложений .....	56
8.3 Расчет годовых эксплуатационных расходов. ....	59
8.4 Окупаемость.....	63
9 Социальная ответственность.....	64
9.1 Производственная безопасность .....	65
9.2 Экологическая безопасность.....	74
9.3 Расчет выбросов в атмосферу загрязняющих веществ .....	74

9.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	77
9.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	78
Заключение .....	79
Список литературы: .....	83
Приложение А .....	87
Приложение Б .....	101
Приложение В .....	111
Приложение Г .....	139
Приложение Д .....	140
Приложение Е .....	150
Приложение Ж .....	177
ФЮРА 311271.002.ВО .....	178

## Введение

Энергетика – это важнейшая отрасль народного хозяйства, охватывающая добычу энергетических ресурсов, выработку, преобразование, передачу и использование различных видов энергии. Это основа экономики государства. Развитие человеческого общества неразрывно связано с использованием природных ресурсов нашей планеты, с потреблением энергии в постоянно возрастающих масштабах. Данные проблемы становятся все более актуальными в современном мире [1].

В современных рыночных условиях любое предприятие независимо от вида деятельности должно анализировать эффективность своего производства и искать пути для его улучшения, так как от этого зависит успешность ее деятельности. Привлечение неиспользуемых ресурсов, на покрытие собственных нужд, позволит поднять рентабельность производства, снизить стоимость продукции, что способствует увеличению конкурентоспособности товара на рынке [1].

В настоящее время основными источниками топлива для ТЭЦ являются органические ископаемые углеводороды в различных формах, а именно уголь, нефть и природный газ. Древесные отходы обладают низкой теплотворной способностью. Поэтому данный вид топлива не получил применения для теплоэлектроцентралей, обеспечивающих населенные пункты электроэнергией, горячей водой, отоплением [1].

Томская область располагает значительными запасами древесины, около 60 % территории покрыто лесами [2]. Побочным продуктом на лесоперерабатывающих комбинатах является биотопливо (древесные отходы). Использование данного вида топлива на ТЭЦ способствует повышению рентабельности предприятия. Строительство ТЭЦ, для обеспечения тепловой и электрической энергией является целесообразным решением.

Целью выпускной квалификационной работы является определение эксплуатационных характеристик работы котельной установки паропроизводительностью 50 т/ч при сжигании отходов лесопереработки.

Задачей исследования является определение температуры на выходе из топочной камеры и в ядре горения при сжигании природного газа и древесных отходов. Определение данной характеристики проводилось при помощи поверочного расчета на двух режимах работы. А также при помощи прикладного пакета ANSYS Fluent производилось моделирование для более глубокого изучения процесса горения, протекающего в топочной камере.

## 1 Аналитический обзор проблемы использования кородревесных отходов

В настоящее время кородревесные отходы (КДО) не идут на переработку и, как правило, складываются на свалках твердых бытовых отходов (ТБО), что является не целесообразным использованием данного ресурса. Места захоронения представляют большую опасность для окружающей среды и для жизни людей. Так, например, в Енисейске свалка ЦБК горела несколько месяцев. В результате выделились токсичные вещества, которые распространились на ближайшие жилые кварталы. Горение происходило на площади 3,5 Га, для ликвидации данного инцидента администрации пришлось выделить большую сумму из бюджета города [3].

Проблема оптимального использования древесных отходов ныне является частью общей проблемы повышения эффективности производства [4]. В настоящее время существует 3 основных способа использования древесных отходов: захоронение в специально отведенных местах (что является нецелесообразно), переработка с получением других видов продукции, сжигание с выработкой электрической и тепловой энергии.

Сжигание в специализированных котлоагрегатах, способных вырабатывать тепловую и электрическую энергию, способствует вовлечению данного вида топлива в энергетику страны.

Свойства древесной биомассы оказывает важную роль на конструкцию устройства, в котором будет осуществляется процесс сжигания. Также в значительной мере влияет на эффективность использования водогрейных и паровых котлов.

Основные виды технологий сжигания:

а) Прямое (классическое) сжигание биотоплива:

1) Сжигание древесных отходов в водогрейных и паровых котлах производственно-отопительных котельных;

2) Сжигание в топках промышленных энергетических котлов с конденсационными турбинами;

б) Получение из древесных отходов генераторного газа:

1) Получение генераторного газа и сжигание в паровых и водогрейных котлах;

2) Получение генераторного газа и использование в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания, которые приводят в движение генератор;

в) Производство жидкого топлива:

1) Производство метилового, этилового спирта и использование в качестве топлива для ДВС;

г) Получение твердого топлива с улучшенными свойствами:

1) Производство топливных гранул (пеллетов);

2) Получение древесного угля [1].

Одним из путей рационального использования биомасс является их прямое сжигание в котельных установках. В течение длительного времени, да и в настоящий период, такой способ использования биомасс имеет место в России, Белоруссии, а также в ряде развитых стран США, Финляндии, Швеции. Так, например, в США в 1995 г. было внедрено 360 котельных установок для сжигания биомасс, что составило 1 % от общих мощностей, установленных в стране. Много установок, предназначенных для сжигания биомасс внедрены в России (Бийскэнергомаш, Кировский завод и др.). Вопросами исследований сжигания, разработки конструкций, изготовления и внедрения в производство при сжигании опилок, стружки, щепы и крупных фрагментов древесины в России занимаются НИИ ПО "Бийскэнергомаш", ЗАО ПО "Бийскэнергомаш", ОАО "БиКЗ", ОАО "Белэнергомаш", ТОО "Энерготехнология", НПО "ЦКТИ и др. [2]. В настоящее время отходы деревообрабатывающих комбинатов сжигаются в слоевых топках с наклонными колосниковыми решетками, в слоевых топках системы В.В. Померанцева и в топках многотопливных котлоагрегатов.

Большой интерес представляет сжигание КДО в многотопливном котлоагрегате. Первая попытка создать серийный отечественный многотопливный котельный агрегат принадлежит Белгородскому котельному

заводу. Данный проект способен сжигать наряду с энергетическими топливами (каменные и бурые угли, торф, мазут, газ) высоковлажные древесные отходы [5].

Котел выполнен на основе серийного котлоагрегата БКЗ-75-39. Особенностью данной конструкции является наличие предтопка (рис. 1) [6]. Предтопок оборудован наклонной неподвижной решеткой и чешуйчатой цепной решеткой для сжигания отжатый коры. Предтопок отделен от основной топочной камеры фронтальным экраном. Основная топочная камера оснащена четырьмя горелочными устройствами способными сжигать, угольную пыль, мазут и газ. Через загрузочное устройство отжатая кора попадает на наклонную решетку, где происходит подсушка и частичное горение топлива. Основное горение происходит на чешуйчатой решетке, скорость которой может регулироваться.

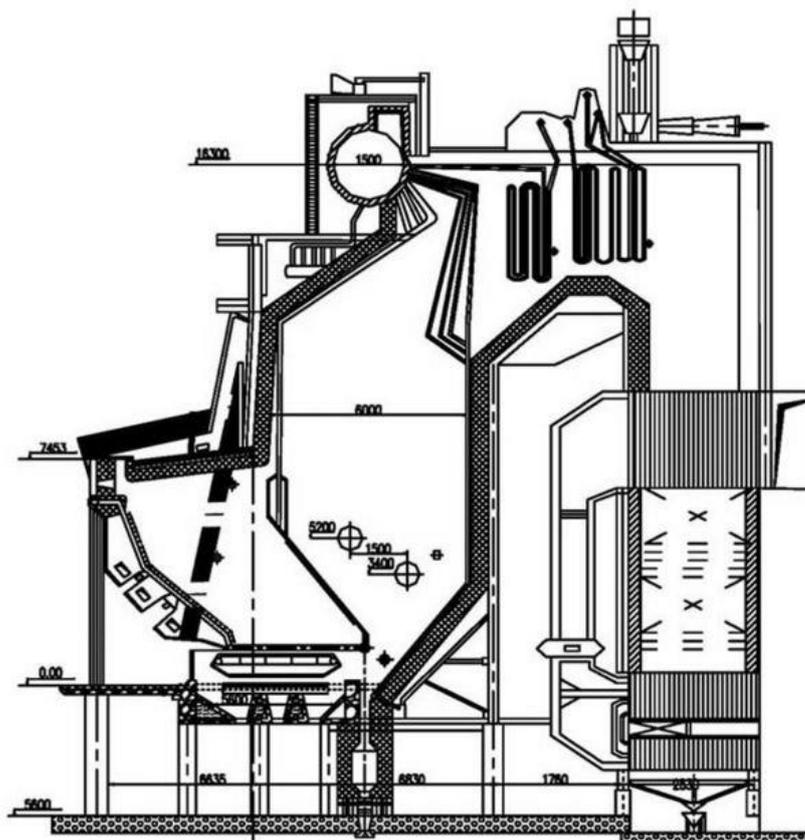


Рисунок 1 – Котлоагрегат КМ-75-40

Основным недостатком данной схемы являлось место сочленения наклонной и цепной решетки. В результате чего плохая герметичность приводила к дымлению через уплотнения и приводила к перегреву первичных

валов цепных решеток. В настоящее время Белгородский котельный завод ведет выпуск котлов на совместном сжигании угля и древесного топлива, рассчитанных на паропроизводительность 2,5 т/ч и обеспечивающих предприятия технологическим паром [6].

## 2 Анализ и обоснование выбора проектных решений

Лесоперерабатывающий комплекс (ЛПК), как правило, включает в себя несколько заводов (фанерный, завод по производству шпона, МДФ/ЛМДФ, ДСП/ЛДСП, ламината, мебели). Работа таких предприятий требует больших энергетических мощностей, поэтому строительство ТЭЦ на территории ЛПК является приоритетным направлением. Проектируемая ТЭЦ будет обеспечивать технологические процессы горячей водой, паром, отапливать производственные помещения и частично перекрывать потребность в электроэнергии. Вовлечение неиспользованных ресурсов в производство способствует снижению расходов на собственные нужды предприятия и, как следствие, повысит конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Проектируемая котельная установка, входящая в энергетический комплекс ЛПК, должна удовлетворять следующим требованиям:

- обладать надежностью и практичностью в эксплуатации;
- обеспечивать высокие параметры пара;
- обеспечивать высокую паропроизводительность для подключения паровых машин (Пример: паровая турбина с регулируемым отбором пара типа П-15-3,43/0,98. Технические параметры: давление перегретого пара 3,43 МПа, температура перегретого пара 435 °С, расход пара 50 т/ч [7]);
- способна сжигать отходы лесопромышленного комбината при различных составах топлива (влажность, зольность, процентное отношение коры в топливе).

Для принятия проектных решений рассмотрим классификацию топочных устройств, их преимущества и недостатки. Сравним с требованиями и на основании рассмотренной информации сделаем выводы о правильности примененной схемы.

## 2.1 Классификация топочных устройств

В качестве основного признака для классификации всех существующих топочных устройств удобнее всего принять метод сжигания топлива. С этой точки зрения все современные топочные устройства можно разделить на две большие группы: слоевые и камерные.

Камерные топки (рис. 2, а) являются наиболее универсальными топочными устройствами, так как в них возможно сжигание любых топлив: газообразных, жидких и разнообразных твердых топлив – от антрацитового штыба до фрезерного торфа. Отличительной особенностью камерных топок от слоевых, является необходимость предварительной подготовки топлива до подачи его в топку.

В то время, как при сжигании в слое (рис. 2, б), предварительная подготовка топлива вне топки либо вообще отсутствует, либо она ограничивается только элементарными операциями – дроблением и сортировкой, камерный метод сжигания твердых топлив требует проведение большой предварительной работы по подготовке топлива вне топки – превращая его в пылевидное топливо или мелко дробленое [5].

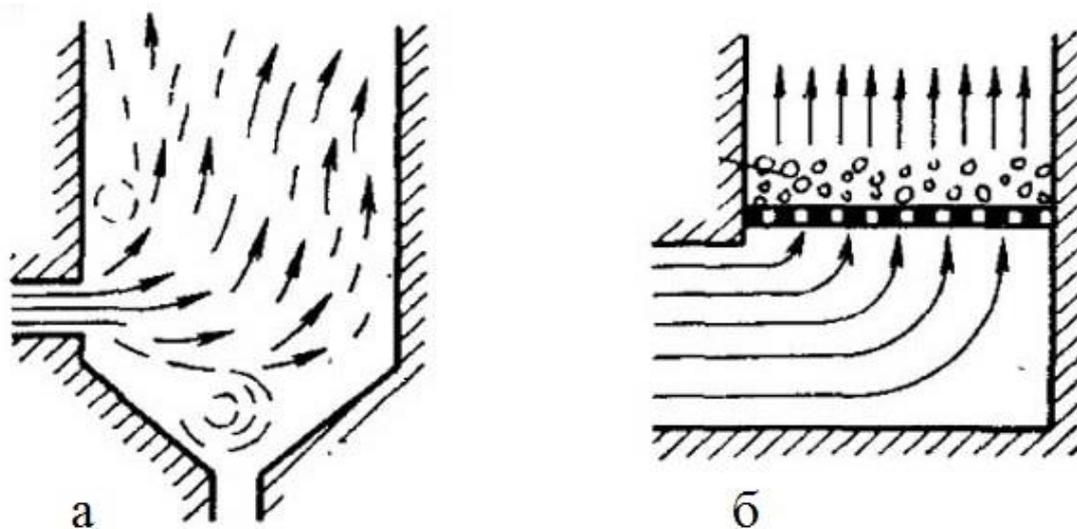


Рисунок 2 – Способы сжигания твердого топлива

## 2.2 Камерные (факельные) топки для сжигания пылевидного топлива

Топка представляет собой вертикальную камеру (как правило, прямоугольного или квадратного сечения) на стенах которой расположены горелочные устройства (рис. 3). При горении топлива в топочной камере высокотемпературные газы выходят в газоход, в котором расположены конвективные поверхности нагрева, унося с собой после горения золые частицы (до 95 % общей массы золы). Крупные золые частицы и образующийся в процессе горения шлак выпадает в нижнюю часть топки, и удаляются механизированным способом при помощи шлакоудаляющего устройства [6].

Камерные топки называют открытыми, если весь объем топочной камеры и настенные экраны открыты для теплового излучения высокотемпературного ядра (зоны активного горения). Если какая-то часть объема топочной камеры и ограждающих радиационных экранов затенена (обычно одним или двумя выступами стен внутрь топки) от прямого теплового излучения из зоны активного горения, то такая топка является полуоткрытой. Температура пылеугольного факела в центре ядра горения превышает температуру плавления золы. Поэтому в топочной камере устанавливаются охлаждаемые водой (пароводяной смесью или паром) поверхности нагрева называемыми топочными экранами, наличие которых позволяет избежать зашлаковывания кирпичных стенок топочной камеры и конвективных поверхностей нагрева (расположенных за топкой) расплавленными частицами золы. Зашлаковывание стенок топки приводит к их износу (под действием высоких температур), а зашлаковывание конвективных поверхностей – к ухудшению теплопередачи, в зависимости от фазового состояния удаляемого шлака топочные устройства делятся на топки с твердым (ТШУ) и жидким (ЖШУ) шлакоудалением (рис. 3) [6].

В топках с ТШУ в нижней части располагается холодная воронка, образованная за счет наклона фронтального и тыльного экрана. Благодаря этому температура в этой части снижается, вылетевшие из ядра горения шлаковые

частицы затвердевают и выпадая на холодные экраны и попадают в систему золошлакоудаления. В топках с ЖШУ в нижней части топки находится высокотемпературная зона горения. Через летку шлак тонкими струйками вытекает в ванну с холодной водой, где происходит гранулирование шлака, и удаление механически в канал гидрозолоудаления.

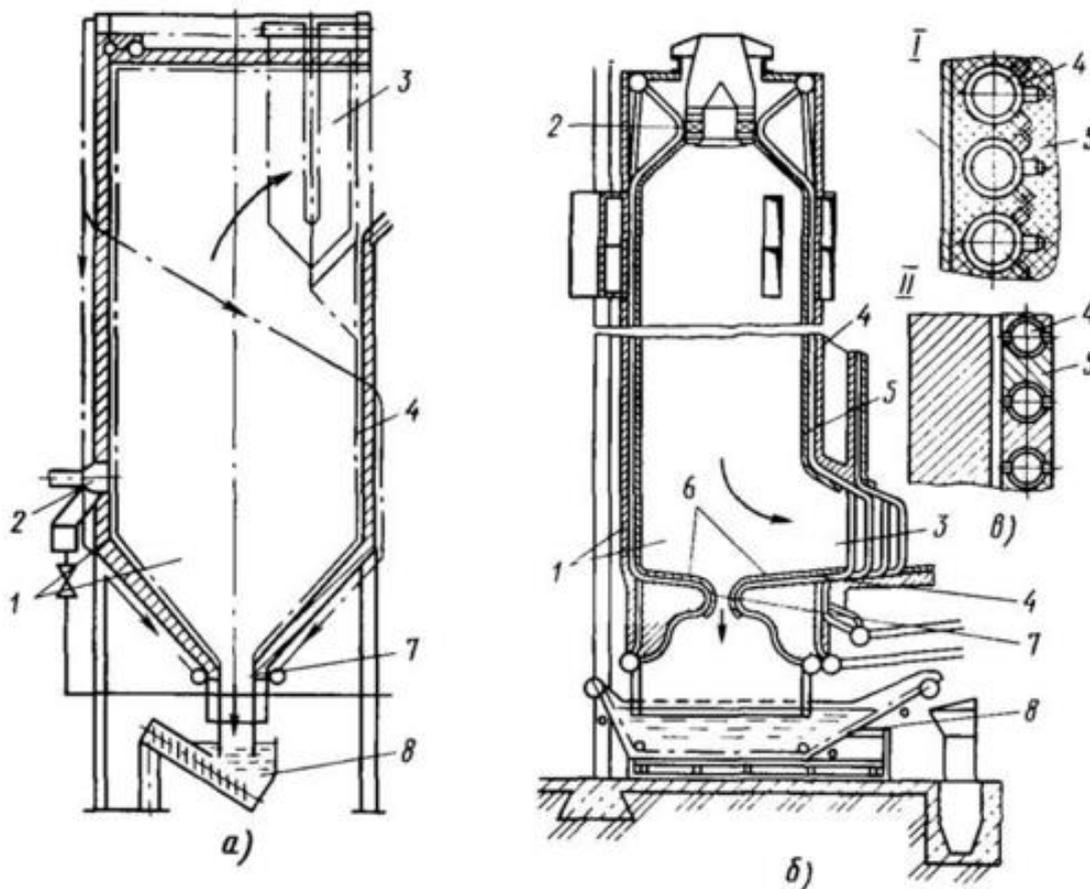


Рисунок 3 – Топки с твердым (а) и жидким (б) шлакоудалением

- 1 – стены топочной камеры, 2 – горелки, 3 – газоход, 4 – экранные трубы,  
 5 – обмазка, 6 – шлаковый под, 7 – воронка шлакоудаления,  
 8 – шлакоудаляющее устройство

Камерные топки для сжигания твердого топлива используют в котельных агрегатах средней и большой производительности.

### 2.3 Слоевые топки

Слоевые топки приспособлены для сжигания твердого кускового топлива. Классификации топок приведены на рисунке 4. Они получили широкое применение в котлах малой и средней мощности. Данный вид топок прост в эксплуатации, приспособлен для сжигания различных сортов топлив, не требуют больших объемов топки, способны работать со значительными колебаниями тепловой нагрузки, отличаются относительно небольшим расходом энергии на собственные нужды и, главное, не требуют тщательной подготовки топлива перед подачей в топочную камеру. В последние годы все расширяющееся применение находят и топки с кипящим слоем [7].



Рисунок 4 – Классификация слоевых топок

Для сжигания твердого топлива в плотном слое применяют разнообразные классификации топок, различающиеся как теплотехническими характеристиками (режимом подачи топлива и воздуха, организацией смесеобразования, тепловой подготовкой), так и конструктивным выполнением. Обслуживание топки, в которой топливо сжигается в слое, включает следующие операции: подачу топлива в топку, шурование слоя, т. е. перемещение кусочков топлива относительно друг друга и колосниковой решетки, на которой топливо

сжигается (для улучшения условий подвода окислителя); удаление из топки шлака [7].

В зависимости от степени механизации процесса горения топочные устройства делятся:

- немеханизированные (все выполняются вручную);
- полумеханические (механизированы несколько операций);
- механические (механизированы все операции).

По режиму подачи топлива различают топки с периодической и непрерывной загрузкой топлива. Подача топлива в топку оказывает важное влияние на работу топочного устройства. По организации тепловой подготовки и воспламенения топлива в слое различают топки с нижним, верхним и смешанным воспламенением.

Характерной особенностью слоевых топок является устойчивость процесса горения, благодаря наличию в них значительного количества запаса горящего топлива. Это обстоятельство определяет большую тепловую инерционность процесса, позволяющую регулировать мощность топки в определенных пределах только изменением количества подаваемого воздуха. Дальнейшее регулирование производится изменением количества топлива, подаваемого в топку [8].

Время пребывания частиц топлива в слоевых топках можно считать ничем не ограниченным, если фракционный состав топлива и тягодутьевой режим обеспечивают устойчивое состояние поверхности горящего слоя топлива.

## 2.4 Немеханизированные топочные устройства

Простейшим немеханизированным топочным устройством, сохранившимся еще и сейчас в отдельных установках малой мощности (паропроизводительностью до 0,3 кг/с), является топка с ручной периодической подачей топлива на колосниковую решетку. Колосниковая решетка поддерживает сжигаемое топливо и одновременно служит для распределения

воздуха, поступающего через нее в слой. Дальнейшее рассмотрение данной топки нецелесообразно, так как она не соответствует требованиям, предъявляемым к котельной установке.

## 2.5 Полумеханические слоевые топки

В наиболее распространенных типах полумеханических топок обеспечивается самопроизвольное и постепенное движение топлива вдоль горячего слоя под действием силы тяжести. Очистка топки от золы и шлаков при этом несколько облегчается, но полностью не механизмуется, ручного вмешательства в процесс горения обычно не требуется.

Схемы топок с неподвижными наклонными колосниковыми решетками получили широкое применение для сжигания высоковлажных топлив, главным образом торфа и дров. На рисунке 5 представлена шахтная топка для кускового торфа.

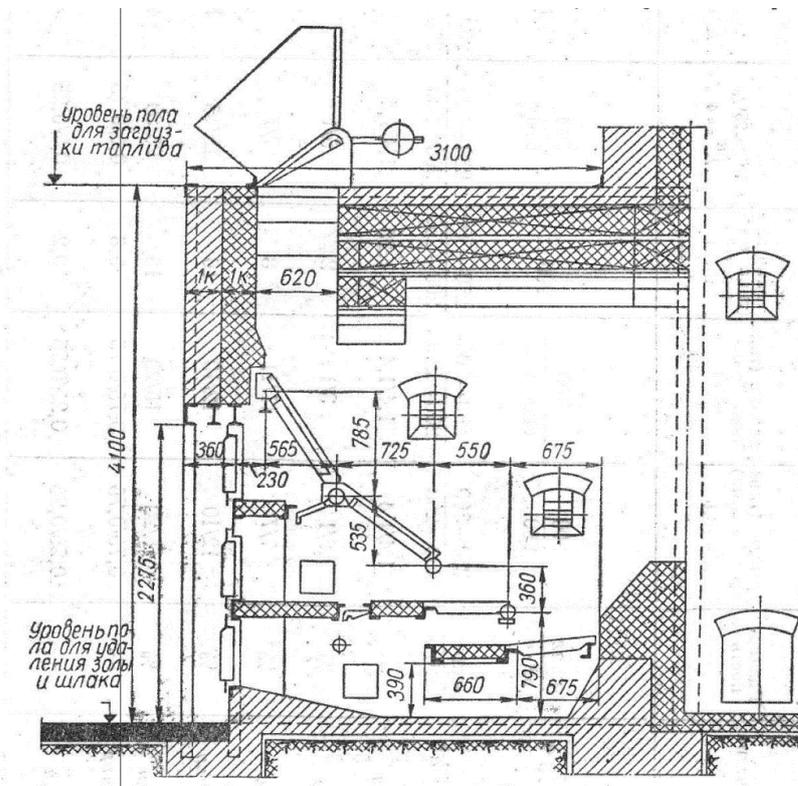


Рисунок 5 – Шахтная топка для кускового торфа

В загрузочном бункере шахты создается некоторый запас топлива, обеспечивающий непрерывность поступления его в топку. Наличие топлива в шахте также ликвидирует присос воздуха при загрузке топлива и периодичность процесса горения, являющегося одним из главных недостатков с ручной загрузкой топлива [6].

Своды, перекрывающие топку, способствуют лучшей подсушки топлива и более быстрому его зажиганию. Часть тепла топлива получается от большого количества небольших очагов, возникающих на наклонных колосниках решетки. Но основное количества тепла, необходимое для подсушки и его прогрева, передается топливу в шахте от мощного очага горения, находящегося на горизонтальных колосниках.

## 2.6 Механизированные слоевые топки

Топки с механическими цепными решетками представляют собой полностью механизированные топочные устройства, лишь эпизодически требующие ручного вмешательства в свою работу для шуровки слоя при сжигании некоторых видов топлива (спекающихся углей).

Слой топлива в этих топках относительно колосниковой решетки неподвижен, однако сама решетка вместе с горящим на ней слоем топлива непрерывно движется в топке, также непрерывно подается в нее свежее топливо и транспортируются очаговые остатки на сброс в шлаковые бункеры [6].

Таким образом, по своему типу эти топки относятся к категории топок с подачей топлива вдоль горящего слоя. Они широко применяются на практике, как для котлов малой и средней мощности, так и для котлов, дающих 140–150 т пара в час, а в нашей стране освоено применение этих топок для сжигания торфа под котлами с паропроизводительностью до 200 т/час [6].

На рисунке 6 представлен продольный разрез чешуйчатой цепной решетки ЧЦР прямого хода. Топливо на колосниковое полотно 5 поступает из угольного ящика 3. Задняя часть решетки перекрыта шлакоснимателем 8,

направляющим шлак в шлаковый бункер. Воздух, необходимый для горения, подводится в зонные камеры решетки, откуда через зазоры между колосниками поступает к слою топлива. Для решеток шириной менее 2,7 м воздух подводят с одной стороны.

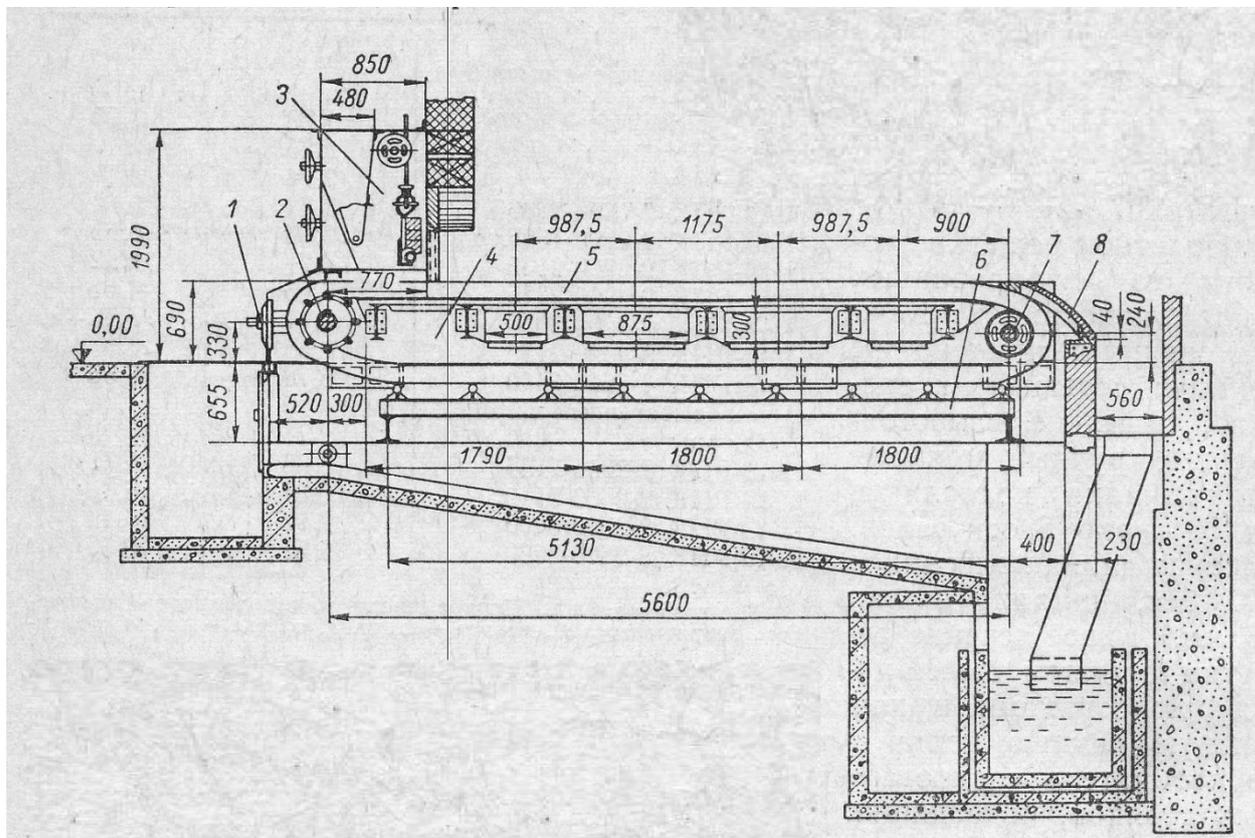


Рисунок 6 – Продольный разрез чешуйчатой цепной решетки ЧЦР прямого хода

- 1 – фронтальной кожух, 2 – передний вал, 3 – угольный ящик, 4 – рама,  
 5 – колосниковое полотно, 6 – опорный рольганг, 7 – задний вал,  
 8 – шлакосниматель

Движение к колосниковому полотну сообщается через передний вал, звездочки которого перемещают ролики колосникового полотна и толкают его. Скорости движения полотна могут изменяться от 2,3 до 16,0 м/ч регулированием четырехскоростного электродвигателя и переключением коробки скоростей редуктора. Колосниковое полотно в хвостовой части опирается на шкивы заднего вала. Подшипники переднего вала роликовые, заднего скользящие. В

нижней части колосниковое полотно опирается на ролики опорных катков. Колосники перекрывают друг друга, образуя подобие чешуи.

Топки изготавливаются правого и левого исполнения, т.е. с расположением привода и воздухопроводов с правой или левой стороны, если смотреть со стороны фронта топки [9].

## 2.7 Обоснование выбранной схемы сжигания

Проанализировав существующие схемы, был сделан вывод о неудовлетворении одному или нескольким пунктам, предъявлявшимся к проектируемой установке. Камерные топки способны обеспечивать большую паропроизводительность при высоких параметрах пара. Однако возникает вопрос о подаче ДО в топочную камеру и обеспечение стабильного горения топлива. Слоевые топки спроектированы под сжигания низкосортного топлива, в том числе и древесных отходов, но ограничены в паропроизводительности.

Для удовлетворения предъявленным требованиям выбрана многотопливная схема сжигания, включающая в себя классическую камерную топку, способную сжигать природный газ, и предтопок, представляющий слоевую топку шахтного типа, предназначенный для сжигания КДО.

П-образная компоновка наиболее распространена, так как позволяет логически увязать элементы котельной установки. В подъемной шахте находится топочная камера, а в опускной располагаются конвективные поверхности нагрева. Преимуществом выбранной компоновки является удобство расположения тягодутьевых машин на нулевой отметке, тем самым это поможет избежать вибрационных нагрузок на каркас котла и расположить дробеочистку конвективных поверхностей нагрева. К недостаткам данной компоновки можно отнести поворот топочной камеры на 180°, что приводит к неравномерному омыванию и золовому износу конвективных поверхностей нагрева.

Шахтная слоевая топка проста в обслуживании и эксплуатации. Хорошо подходит для сжигания древесных отходов, имеющих влажность около 60 %, за счет наличия большого запаса топлива, находящегося в активной зоне горения. Благодаря шурующим планкам все три операции механизированы (подача топлива, шуровка, удаление), что, безусловно, является плюсом в котлах с большим расходом топлива. Шурующая планка препятствует образованию прогаров (кратеров) и спекаемости топлива [9].

### 3 Описание объекта исследования

Объектом исследования является топка и предтопок многотопливного котельного агрегата марки Е-50-3,9-440 ДГ. Данный агрегат способен сжигать природный газ и древесные отходы. Котельная установка состоит из камерной топки П-образной компоновки и слоевой топки шахтного типа (рис. 7).

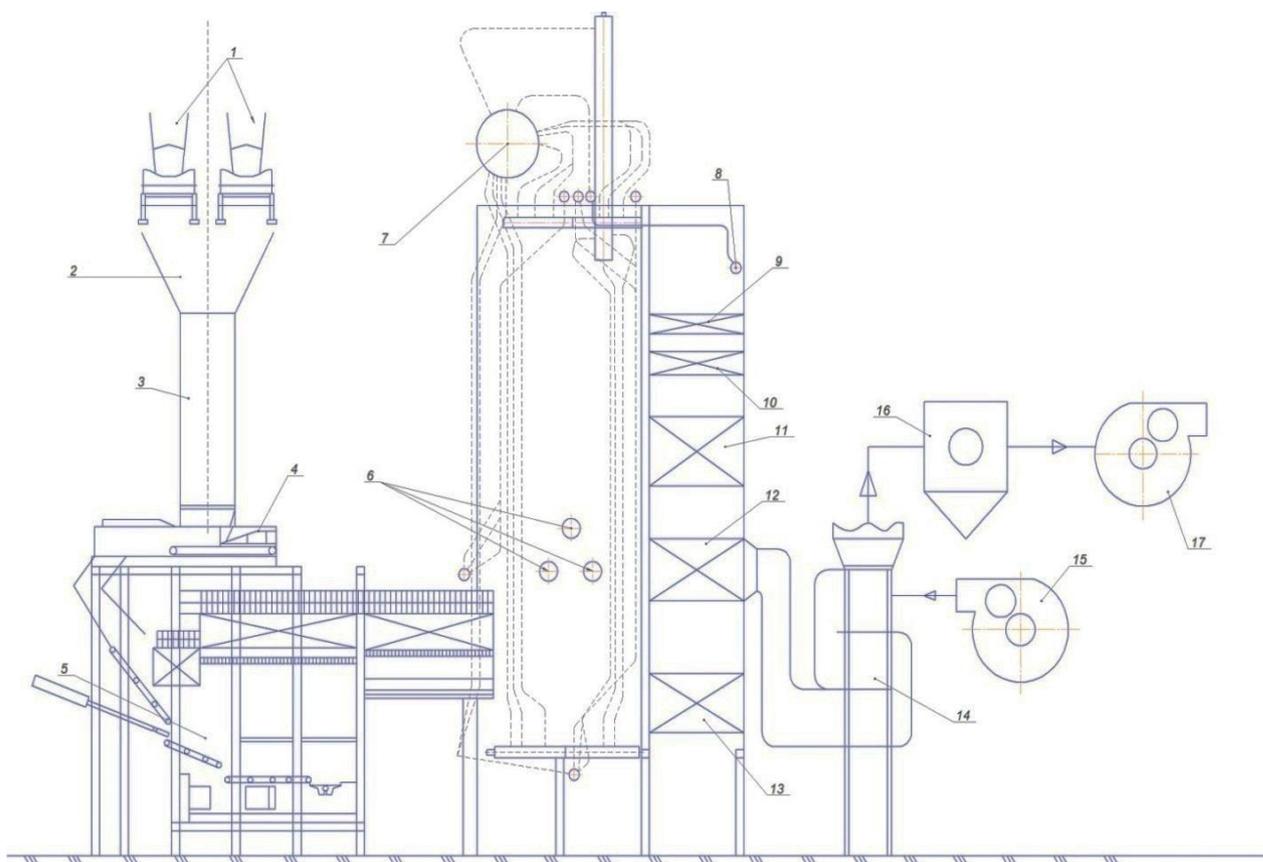


Рисунок 7 – Компоновка котельной установки с паровым котлом Е-50-3,9-440ДГ

- 1 – транспортер топочный, 2 – приемный бункер, 3 – рукав топливный,  
4 – питатель-дозатор, 5 – топочное устройство, 6 – горелочные устройства,  
7 – барабан котла, 8 – настенный пароперегреватель, 9 – пароперегреватель 2-й  
ступени, 10 – пароперегреватель 1-й ступени, 11 – экономайзер 2-й ступени,  
12 – воздухоподогреватель 2-й ступени, 13 – экономайзер 1-й ступени,  
14 – воздухоподогреватель 1-й ступени, 15 – дутьевой вентилятор,  
16 – батарейный циклон, 17 – дымосос

### 3.1 Камерная топка котельной установки

Камерная топка выполнена в газоплотном исполнении, на выходе расположен двухрядный фестон. Опыт сжигания растительных отходов показал, что даже при их низкой зольности имеет место формирование мощных отложений на котельных пучках [10]. Вследствие этого пароперегреватели первой и второй ступени были расположены в опускной конвективной шахте. Данное решение позволит производить очистку конвективных поверхностей с помощью дробеочистительной установки. Воздухоподогреватель первой ступени вынесен в отдельный газоход для уменьшения высоты каркаса котла. Тем самым снизив металлоемкость установки. П-образная компоновка способствует размещению тягодутьевых машин на нулевые отметки. Данное решение позволяет избежать лишней нагрузки и вибрации на каркас котла.

Экранные поверхности топочной камеры выполнены из труб диаметром 60×3 мм с шагом 70 мм. Топочная камера оснащена шестью газомазутными горелками (рис. 7). Объем топочной камеры составляет 221 м<sup>3</sup>. Барабан котла имеет внутренний диаметр 1580 мм, с толщиной стенки 36 мм. КПП 1 выполнен из труб диаметром 32×3 мм, продольный шаг 75 мм, поперечный 55 мм. Теплообменная поверхность 170 м<sup>2</sup>. КПП 2 выполнен из труб диаметром 32×3 мм, продольный шаг 75 мм, поперечный 55 мм. Теплообменная поверхность 115 м<sup>2</sup>. ВЭК 1 выполнен из труб диаметра 28×3 мм, продольный шаг 50 мм, поперечный 35 мм. Теплообменная поверхность 290 м<sup>2</sup>. ВЭК 2 выполнен из труб диаметра 28×3 мм, продольный шаг 50 мм, поперечный 35 мм. Теплообменная поверхность 220 м<sup>2</sup>. ВП 1 выполнен из труб диаметра 40×1,5 мм, продольный шаг 30 мм, поперечный 42 мм. Теплообменная поверхность 1420 м<sup>2</sup>. ВП 2 выполнен из труб диаметра 40×1,5 мм, продольный шаг 30 мм, поперечный 32 мм. Теплообменная поверхность 790 м<sup>2</sup>. Расположение поверхностей нагрева, опор, колонн, горелок, барабана и других элементов котла представлено на чертеже общего вида ФЮРА.311271.001 ВО.

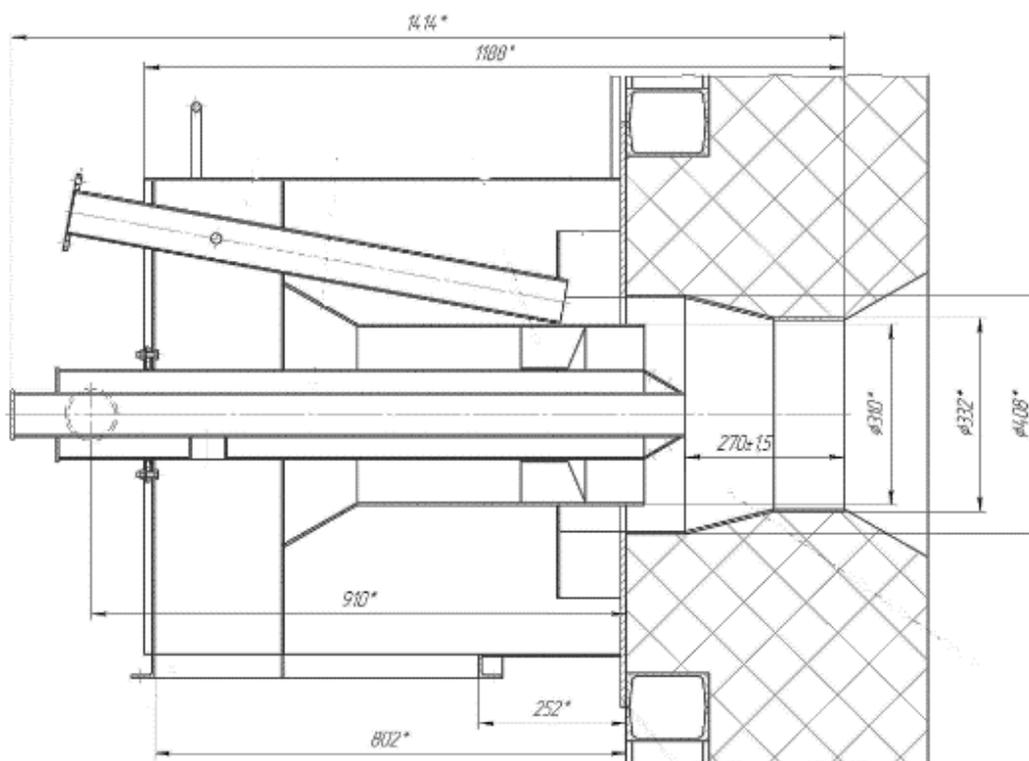


Рисунок 8 – Газомазутная горелка

С помощью горелочных устройств (рис. 8), расположенных в камерной топке, сжигается природный газ. Низшая теплота сгорания составляет 8400 Ккал/нм<sup>3</sup>. Основной состав представлен в таблице 1 [11].

Таблица 1 – Состав природного газа

Название	Обозначение	Значение	Размерность
Азот	N <sub>2</sub>	2,5	%
Углекислота	CO <sub>2</sub>	0,5	%
Метан	CH <sub>4</sub>	92,8	%
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,8	%
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,9	%
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,4	%
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,1	%
Влагосодержание	W	10,1	г/нм <sup>3</sup>

### 3.2 Слоевой предтопок котельной установки

Предтопок представляет собой топочное устройство шахтного типа для сжигания древесных отходов низшая теплота сгорания, которого, составляет 1734 Ккал/кг (состав приведен в таблице 2 [12]). Данные топочные устройства применяются для организации мини-ТЭЦ на древесных отходах с использованием паровых котлов [13]. Предтопок представлен на рисунке 9. Данная топочная камера оснащена толкателями, препятствующими зависанию топлива, обеспечивающими перемешивание его и удаление золы и шлака из предтопка.

Таблица 2 – Состав древесных опилок

Название	Обозначение	Значение	Размерность
Углерод	$C^p$	23,28	%
Сера	$S^p$	0	%
Водород	$H_2$	2,764	%
Кислород	$O_2$	19,29	%
Азот	$N_2$	0,305	%
Влага	$W^p$	53,9	%
Зольность	$A^p$	0,2	%

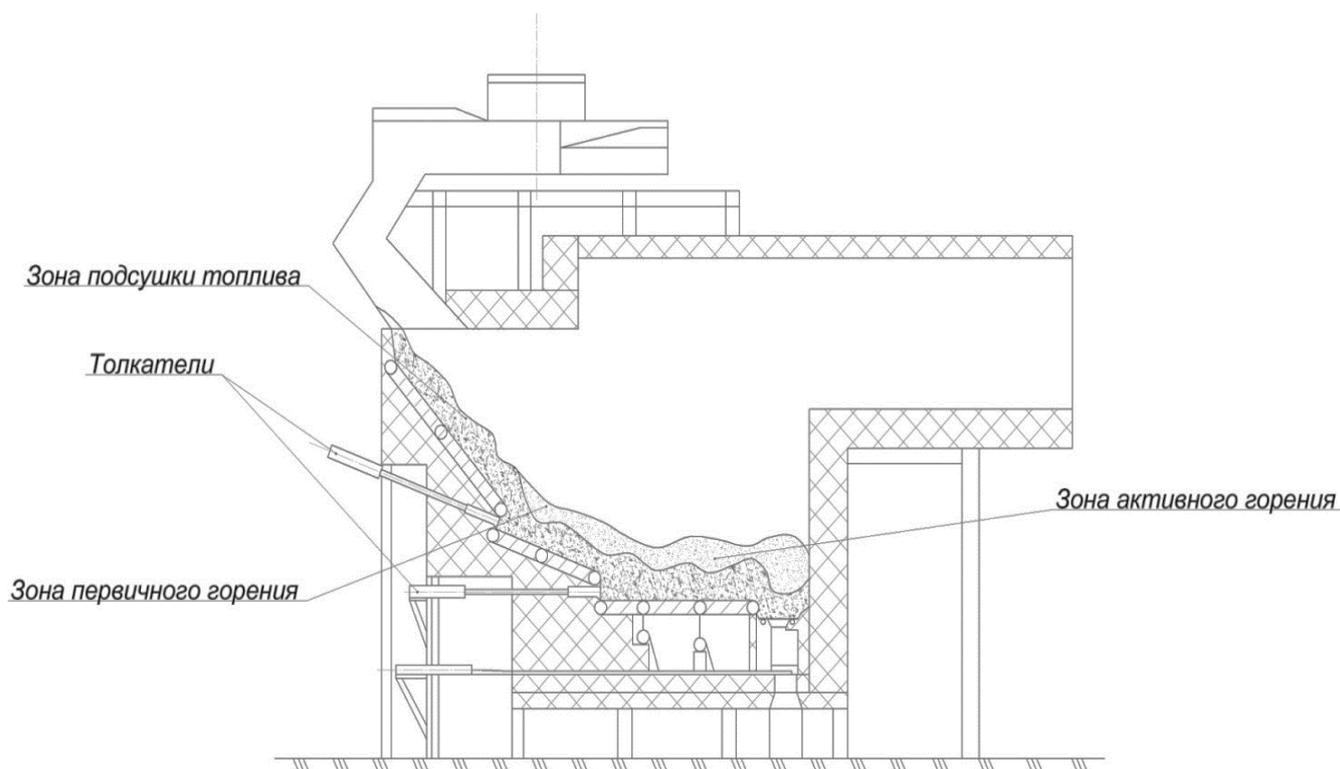


Рисунок 9 – Предтопок котельной установки Е-50-3,9-440ДГ

Процесс подсушки топлива происходит на наклонных колосниках – зона "подсушки". На наклонно-горизонтальных колосниках начинается процесс горения – зона "первичного горения". Основное же горение происходит на горизонтальных колосниках – зона "основного горения". Габаритные размеры предтопка представлены на чертеже общего вида ФЮРА.311272.002 ВО.

Данная схема способна работать на древесных отходах, на природном газе и на смешанном режиме при сжигании древесных отходов и природного газа.

#### 4 Методы и средства исследования котельной установки

Исследование диагностических показателей установки Е-50-3,9-440ДГ будет производиться при помощи поверочного теплового расчета режимов работы и математического моделирования. В ходе, которого в качестве параметра для исследования выбрана температура на выходе из топочной камеры и адиабатическая температура. Распределение теплоты, передаваемой радиационным и конвективными поверхностями котла, определяется значением температуры продуктов сгорания на выходе из топки. При увеличении этой температуры интенсифицируется радиационный теплообмен. Следовательно, уменьшаются конвективные поверхности нагрева и, как следствие, снижается расход электроэнергии на тягу и дутье. Снижение температуры на выходе из топки приводит к обратному эффекту. Оптимальная температура определяет технико-экономические показатели котельной установки.

Поверочный расчет для котельной установки выполняется с целью выявления его тепловых характеристик. Для поверочного расчета известны габаритные размеры элементов котельной установки, и начальные и конечные параметры: паропроизводительность, давление, температура пара, температура питательной воды [14].

Более глубокое изучение процессов, протекающих в котельной установке на стадии проектирования, способно дать математическое моделирование. В последние годы без математического моделирования не обходится разработка современных технических устройств. Моделирование топочной камеры исследуемого объекта будет производиться с помощью программного продукта ANSYS FLUENT, который позволяет решать самые разнообразные задачи, связанные с горением, многофазным течением сжимаемых сред, теплообменом, теплопроводностью, гидро и газодинамикой [15].

Рассматриваемая задача описывается уравнением энергии для продуктов сгорания, уравнением теплопроводности, уравнением Навье-Стокса для трех координат, уравнением неразрывности. Описываемая система уравнений

дополнена уравнениями переноса субстанции для кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  (эпсилон), поскольку используется стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0, \quad (4.1)$$

где  $\rho$ , – плотность;

$t$  – время;

$x, y, z$  – координаты;

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

Уравнения Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \nu \text{grad} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \nu \text{grad} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \nu \text{grad} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right). \end{cases} \quad (4.2)$$

где  $t$  – время;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;

$\rho$  – 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,  $x \in \Omega$ , 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:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho a_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho a_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho a_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right). \quad (4.3)$$

Эффективный коэффициент температуропроводности (с учетом турбулентного переноса).

$$a_{eff} = \left( a + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right). \quad (4.4)$$

Уравнение переноса субстанции для кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  через объемные плотности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho k \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho k \bar{w}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \varepsilon \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \varepsilon \bar{w}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} G_k = -\rho \bar{u}'u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \bar{u}'v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \rho \bar{u}'w' \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \rho \bar{v}'u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \bar{v}'v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \\ - \rho \bar{v}'w' \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \rho \bar{w}'u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \bar{w}'v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \rho \bar{w}'w' \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$G_b = -\beta g \frac{\mu_T}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (4.8)$$

где  $G_k$  – слагаемое, описывающее генерацию кинетической энергии турбулентности;

$G_b$  – слагаемое, описывающее генерацию турбулентности за счет плавучести.

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_T^2, \quad (4.9)$$

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

$M_T$  – турбулентное число Маха.

$$M_T = \frac{k}{w_{\text{ср}}^2}, \quad (4.10)$$

где  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;

$C_{2\varepsilon} = 1,92$ ;

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{w}{u}\right|;$$

$$C_{\mu} = 0,09.$$

Уравнение переноса излучения для P-1 модели:

$$-\nabla q_r = AG - 4A\sigma_0 T^4, \quad (4.11)$$

где  $A$  – коэффициент поглощения среды;

$\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$G$  – падающее излучение.

Кинетическая скорость реакции определяется следующей формулой

$$w_{kin} = A_k \cdot p^2 \cdot c_f \cdot c_{ox} \cdot \exp[-E / (R_{un} \cdot T)], \quad (4.12)$$

где  $A_k$  – постоянный коэффициент м<sup>3</sup>/(кг·с);

$E$  – энергия активации химической реакции, Дж/моль;

$R_{un}$  – универсальная газовая постоянная.

Скорость турбулентного горения, согласно EBU модели, вычисляется по формуле [14].

$$w_t = A_{EBU} \cdot p \cdot (\varepsilon / k) \cdot \min\{c_f \cdot c_{ox} / \nu\}, \quad (4.13)$$

где  $\varepsilon$  – 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.

$$w = \sqrt{w_{kin}^2 + w_t^2}. \quad (4.14)$$

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.

Дискретная модельная фаза (DPM) моделирует траектории движения частиц капли вычисленной в Лагранжевых координатах. Модель описывает

разделение частиц, сушка распылением, сжигание жидкого и твердого топлива [16].

Траектория рассчитывается путем интеграции баланса сил частица уравнением:

$$\frac{du_i^p}{dt} = F_D(u_i - u_i^p) + g_i(\rho_p - \rho) / \rho_p + F_i / \rho_p, \quad (4.15)$$

где  $F_D(u_i - u_i^p)$  – сила функция увеличения функции относительно скорости;

$g_i(\rho_p - \rho) / \rho_p$  – сила тяжести;

$F_i / \rho_p$  – дополнительные силы: градиент давления, термофоретических, вращающейся системе отсчета, броуновское движение. Для отражения частиц, коэффициент восстановления:

– нормальная составляющая.

$$e_n = \frac{v_{2,n}}{v_{1,n}}. \quad (4.16)$$

– тангенциальная составляющая.

$$e_t = \frac{v_{2,t}}{v_{1,t}}. \quad (4.17)$$

Модель дискретного случайного блуждания для k-ε модели с использованием RSM колебания скорости эквивалентны во всех направлениях.

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (4.18)$$

$$v' = \zeta \sqrt{v'^2}. \quad (4.19)$$

$$w' = \zeta \sqrt{w'^2} \quad (4.20)$$

Использовалась модификация k-ε модели турбулентности, хорошо зарекомендовавшая себя в задачах с сильной кривизной линий тока. Данная модель справедлива для полностью развитого турбулентного течения, т.е. для высоких чисел Рейнольдса, когда прямое влияние вязкости на структуру турбулентности пренебрежимо мало [13,14].

### 8.1 Хозяйственные цели научного исследования

На данное время новизна научного исследования определяется большей частью коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Из этого можно сделать вывод что, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, а также модернизация устаревшего оборудования и внедрение новых более эффективных установок [20].

При решении задач по достижению цели была сформирована структура и содержание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

### 8.2 Расчет капитальных вложений

На стадии предварительных экономических расчетов, а это соответствует этапам технической подготовки производства: «Техническое предложение», «Технический проект», капитальные вложения можно определять по формуле 1 (разработка ЦКТИ им. Ползунова):

$$\begin{aligned} K &= C_{пол} + C_{пол} \cdot P_n / 100 + K_{тр} + K_{пот} + K_{стр} = \\ &= 7140672 + 7140672 \cdot 20 / 100 + 142813.44 + \\ &+ 1285320.96 + 12895000 = 2146380,64 \text{ руб} \end{aligned} \quad (8.1)$$

где  $C_{пол}$  – полная стоимость парового котла;

$P_n$  – средняя рентабельность по парогенераторостроению (20 %);

$K_{тр}$  – транспортно–заготовительные расходы (приняты 2 % от  $C_{пол}$ );

$K_{пот}$  – сопутствующие затраты у потребителя;

$K_{стр}$  – затраты на строительную часть у потребителя.

Суть данной разработки заключается в том, что себестоимость изготовления парового котла ставится в зависимость от его параметров, которые в качестве коэффициентов вводятся в данную формулу:

### 8.2.1 Себестоимость парового котла

$$\begin{aligned} C_{пол} &= D \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8 \cdot 2000 \cdot K_{пер} = \\ &= 50 \cdot 0,7 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 1,15 \cdot 0,8 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 2000 \cdot 70 = 7140672 \text{ руб}, \end{aligned} \quad (8.2)$$

где  $D$  – Часовая паропроизводительность проектируемого котла;

$K_1$ – $K_8$  – коэффициенты учитывающие;

$K_1=0,8$  – паропроизводительность проектируемого котла;

$K_2=1,2$  – параметры пара;

$K_3=1$  – перегрев пара;

$K_4=1,15$  – способ поставки;

$K_5=1$  – вид топлива;

$K_6=1,08$  – компоновка котла;

$K_7=1$  – число корпусов;

$K_8=1$  – тип котла;

$K_{пер}=70$ – коэффициент пересчета на современные цены.

### 8.2.2 Транспортно–заготовительные расходы

$$K_{тр} = 0,02 \cdot C_{пол} = 0,02 \cdot 7140672 = 142813,44 \text{ руб}. \quad (8.3)$$

### 8.2.3 Сопутствующие затраты у потребителя

$$K_{пот} = K_m + K_{об} = 2687489,28 + 3359361,6 = 6046850,88 \text{ руб}. \quad (8.4)$$

– затраты на монтаж оборудования парового котла;

$$K_m = 0,08 \cdot C_{пол} = 0,08 \cdot 7140672 = 571253,76 \text{ руб}. \quad (8.5)$$

– затраты на обмуровку котла.

$$K_{об} = 0,1 \cdot C_{пол} = 0,1 \cdot 7140672 = 714067,2 \text{ руб}. \quad (8.6)$$

## 8.2.4 Затраты на строительство у потребителя

### 8.2.4.1 Стоимость здания, приходящаяся на ПГ

$$K_{зд} = S_m \cdot k_{дп} \cdot C_{зд} \cdot h_{кот} = 260 \cdot 2 \cdot 1200 \cdot 20 = 12480000 \text{ руб.}, \quad (8.7)$$

где  $S_m = 260 \text{ м}^2$  – площадь парового котла;

$k_{дп} = 2$  – коэффициент, учитывающий дополнительную площадь;

$C_{зд} = 1200 \text{ руб/м}^2$  – стоимость 1  $\text{м}^2$ ;

$h_{кот}$  – высота котельного цеха (верхняя отметка ПГ+3–4м).

### 8.2.4.2 Стоимость фундамента

$$K_{ф} = D \cdot k_{ф} = 50 \cdot 8300 = 415000 \text{ руб.} \quad (8.8)$$

Коэффициент, учитывающий влияние производительности котла на стоимость фундамента.

$$k_{ф} = \eta \cdot 10^4 = 0,83 \cdot 10^4 = 8300 \text{ руб} \quad (8.8)$$

### 8.2.4.3 Суммарные затраты на строительство

$$K_{смп} = K_{зд} + K_{ф} = 12480000 + 415000 = 12895000 \text{ руб} \quad (8.9)$$

В таблице 5 сведены капитальные затраты на покупку парогенератора, а так же затраты на монтаж.

Таблица 5 – Сводная таблица капитальных вложений в сооружение парового котла

Состав капитальных вложений	Величина	
	Тыс.руб.	%
Себестоимость парогенератора	7140,672	33,268
Затраты на монтаж	571,25376	2,66
Затраты на обмуровку	714,0672	3,3
Стоимость строительства	12895	60,04
Транспортно –заготовительные расходы	14,2813	0,13
Наценка на ПГ	142,813	0,67
Общие капитальные вложения	214638,064	100

### 8.3 Расчет годовых эксплуатационных расходов.

#### 8.3.1 Годовые затраты на топливо

$$I_{\text{топ}} = B_p \cdot h_{\text{год}} \cdot (1 + B_{\text{пот}}/100) \times \Pi_{\text{т.н.т}} = 25 \cdot 6500 \cdot (1 + 5/100) \times 200 = \quad (8.10) \\ = 341250 \text{ тыс.руб}$$

где  $B_p = 25$  т/ч – часовой расход натурального топлива, т/час;

$h_{\text{год}} = 6500$  час/год – число часов использования установленной мощности;

$B_{\text{пот}} = 5$  % – суммарная величина потерь топлива на территории котельной в % от годового потребления топлива;

$\Pi_{\text{т.н.т}} = 200$  руб./т – цена древесной щепы за 1 м<sup>3</sup> [21].

#### 8.3.2 Амортизационные отчисления

$$I_a = p_n / K = 4/100 \cdot 214630,949 = 8580,55 \text{ тыс.руб} , \quad (8.11)$$

где  $p_n = 4$  % – норма амортизационных отчислений на капитальный ремонт и на реновацию для котельной установки;

$K$  – капитальные вложения (см. табл.5).

#### 8.3.3 Затраты на текущий ремонт

$$I_{\text{тр}} = 0,2 \cdot I_a = 0,2 \cdot 8580,55 = 1710,712 \text{ тыс.руб} . \quad (8.12)$$

#### 8.3.4 Затраты на воду

Рассчитывается исходя из пароводяного баланса котельного цеха для определения затрат на воду, которая потребляется для добавки в цикл с целью компенсации потери ее из цикла и для хозяйственных нужд.

$$I_g = D_{\text{пр}} \cdot h_{\text{год}} \cdot \Pi_g = 2590,350 \text{ тыс.руб} , \quad (8.13)$$

где  $D_{\text{пр}} = 0,57$  – часовой расход воды на продувку, т/час;

$\Pi_g = 70$  руб – стоимость воды с учетом химводоочистки.

### 8.3.5 Затраты на заработную плату обслуживающего персонала

Расходы на содержание обслуживающего персонала складываются из: заработной платы эксплуатационного, ремонтного и управленческого персонала котельного цеха, отнесенная на один парогенератор. Прямая заработная плата определится из штатного расписания котельного цеха и должностных окладов, приведенных в таблице 6.

Таблица 6 – Штатное расписание котельного цеха

Наименование должностей	Норма обслуживания в смену	Месячный оклад	Месячный оклад на 1 парогенератор
1	2	3	4
	ПГ/чел.	Руб./мес.	Руб.
Старший машинист	3	17000	17000
Машинист котлов разряда	2	16300	24450
Машинист котлов разряда	1	16000	48000
Машинист багерной насосной	6	15800	7900
Машинист насосных	3	15700	15700
Машинист обходчик по котельному оборудованию	3	15500	15500
Котлочист	3	14500	4833
Зольщик	3	14100	4700
Слесарь по ремонту котельного оборудования	2	14200	7100
Продолжение таблицы 6	2	3	4
Дежурный слесарь	6	13800	2300
Дежурный электрик	6	13800	2300
Электросварщик	6	14000	2333
Газоэлектросварщик	6	14100	2350
Газорезчик	6	14100	2350
Печник	3	14500	4833
Крановщик	6	13500	2250

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4
Токарь	6	13800	2300
Кладовщик	3	12500	4167
Уборщица	3	5000	1667
Итого на 1 парогенератор		$3П^{оп}$	172033
Нач. цеха	1	19000	19000
Зам. нач. цеха	1	18200	18200
Нач. смены	3	17800	5933
Ст. мастер	1	16000	16000
Мастер	3	12000	4000
Итого на 1 парогенератор		$3П^{рук}$	63133
Всего по котельному цеху			235166

#### 8.3.5.1 Основная заработная плата обслуживающего персонала.

$$\begin{aligned}
 П_{осн}^{оп} &= (3П^{оп} + 3П^{оп} \cdot (k_{дон} + k_{прем} + k_{рк})) \cdot 12 = & (8.14) \\
 &= (172033 + 172033 \cdot (0,2 + 0,43 + 0,3)) \cdot 12 = 3984,2842 \text{ тыс. руб}
 \end{aligned}$$

где  $k_{дон} = 0,2$  – коэффициент, учитывающий доплаты до часового фонда времени;

$k_{прем} = 0,43$  – коэффициент, учитывающий премии;

$k_{рк} = 0,3$  – районный коэффициент.

#### 8.3.5.2 Дополнительная заработная плата обслуживающего персонала

$$П_{дон}^{оп} = 0,08 \cdot 3П^{оп} \cdot 12 = 0,08 \cdot 172033 \cdot 12 = 165,12 \text{ тыс. руб.} \quad (8.15)$$

#### 8.3.5.3 Общая заработная плата обслуживающего персонала

$$П_{общ}^{оп} = П_{осн}^{оп} + П_{дон}^{оп} = 3984,2842 + 165,12 = 4149,0469 \text{ тыс. руб.} \quad (8.16)$$

#### 8.3.5.4 Основная заработная плата руководящего персонала

$$\begin{aligned}
 П_{осн}^{рук} &= (3П^{рук} + 3П^{рук} \cdot (k_{прем} + k_{рк})) \cdot 12 = 63133 + 63133 \cdot (0,43 + 0,3) = & (8.17) \\
 &= 1310,64 \text{ тыс. руб,}
 \end{aligned}$$

где  $k_{прем} = 0,43$  – коэффициент, учитывающий премии;

$k_{рк} = 0,3$  – районный коэффициент.

#### 8.3.5.5 Дополнительная заработная плата руководящего персонала

$$П_{доп}^{Рук} = 0,08 \cdot 3П^{Рук} \cdot 12 = 0,08 \cdot 63133 \cdot 12 = 65,65 \text{ тыс. руб.} \quad (8.18)$$

#### 8.3.5.6 Общая заработная плата руководящего персонала

$$П_{общ}^{Рук} = П_{осн}^{Рук} + П_{доп}^{Рук} = 1310,64 + 65,65 = 1376,29 \text{ тыс. руб.} \quad (8.19)$$

#### 8.3.5.7 Затраты на заработную плату

$$И_{зн} = П_{общ}^{он} + П_{общ}^{рук} = 41490,0469 + 13760,29 = 55250,33. \quad (8.20)$$

#### 8.3.6 Отчисления на социальные цели

$$И_{соц} = 0,3 \cdot И_{зн} = 0,3 \cdot 55250,33 = 16570,599 \quad (8.21)$$

#### 8.3.7 Прочие расходы.

$$\begin{aligned} И_{пр} &= 0,12 \cdot (И_{зн} + И_{соц} + И_{э} + И_{в} + И_{тр} + И_{а} + И_{мон}) = \\ &= 0,12 \cdot (55250,33 + 16570,599 + 700,744 + 85210,5 + \\ &+ 441,18 + 2205,901 + 478623,6) = 597210,176 \text{ тыс.руб} \end{aligned} \quad (8.22)$$

В таблице 7 представлены эксплуатационные расходы котельной установки.

Таблица 7 – Эксплуатационные расходы

Наименование затрат	Обозначение	Величина, тыс. руб.	Уд. Вес %
Затраты на топливо	И <sub>топ</sub>	341250	33,347
Амортизационные отчисления	И <sub>а</sub>	8580,55	0,838
Затраты на текущий ремонт	И <sub>тр</sub>	1710,712	0,167
Затраты на воду	И <sub>в</sub>	2590,350	0,253
Затраты на электроэнергию	И <sub>э</sub>	0	0
Заработная плата	И <sub>зн</sub>	55250,33	5,399
Отчисления на соц. цели	И <sub>соц</sub>	16750,599	1,637
Прочие расходы	И <sub>пр</sub>	597210,176	58,359
Итого	И <sub>год</sub>	1023342,541	100

Полученные значения эксплуатационных расходов однозначно указывают на преобладающее значение расходов, на обеспечение поставок топлива. На них приходится наибольшая доля ежегодных капиталовложений в работу котельной установки и всей станции.

Первостепенной задачей эффективного управления и эксплуатации парового котла является обеспечение непрерывного снабжения топливом и снижение сопутствующих его потерь при транспортировке и хранении.

### 8.3.8 Себестоимость выработанной тонны пара.

$$C_{\text{выр}} = I_{\text{год}} / D_{\text{год}} = 1023342,541 / 320000 = 319,795 \text{ руб/т} . \quad (8.23)$$

$$D_{\text{год}} = h_{\text{год}} \cdot D = 6500 \cdot 50 = 320000 \text{ т/год} . \quad (8.24)$$

## 8.4 Окупаемость

Общие затраты на строительство и эксплуатации в течении года.

$$C_{\text{общ}} = I_{\text{год}} + K = 1023342,541 + 21463,949 = 1044806,49 \text{ тыс.руб} . \quad (8.25)$$

Затраты лесоперерабатывающего комплекса при тарифе 2,99 руб.за кВт:

$$C_{\text{год}} = 2,99 \cdot 12 \cdot 1000 = 31200 \text{ руб/год} \quad (8.26)$$

1000 кВт – потребляемая мощность ЛПК за сутки.

Затраты лесоперерабатывающего комплекса при тарифе 3,5 за кВт:

$$C_{\text{год1}} = 2,5 \cdot 12 \cdot 1000 = 19800 \text{ тыс.руб/год} . \quad (8.27)$$

Разница между тарифом в томской области для предприятия и собственным тарифом.

$$C_{\text{раз}} = C_{\text{год}} - C_{\text{год1}} = 1668 \text{ тыс.руб/год} \quad (8.28)$$

Окупаемость 1 котла

$$P = C_{\text{общ}} / C_{\text{раз}} = 1044806,49 / 1668 = 626.383 \text{ дня} \quad (8.29)$$

## Список публикаций:

1. Андреев, И. В. Термодинамические параметры взаимодействия основных минеральных соединений твердого топлива [Электронный ресурс] И. В. Андреев, С. А. Павлов; науч. рук. А. Ю. Долгих, А. В. Крайнов //Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5-9 октября 2015 г.: в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). —Т. 1. — [С. 7-9].