

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

Институт: Электронного обучения  
Специальность: 140101 Тепловые электрические станции  
Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

Тема работы
<b>ПРОЕКТ РЕКОНСТРУКЦИИ КОТЛА БКЗ-210-140 СТ. №13 БИЙСКОЙ ТЭЦ</b>

УДК 621.311.22.002.5:621.181.2-6:697.32.001.24.003.1-048.35(571.150)

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>3-6301</b>	<b>Мотвиевский Александр Сергеевич</b>		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>ассистент кафедры атомных и тепловых электростанций</b>	<b>В.Н. Мартышев</b>	-		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>доцент кафедры менеджмента</b>	<b>А.А. Фигурко</b>	<b>к.э.н, доцент</b>		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности</b>	<b>А.А. Сечин</b>	<b>к.т.н.</b>		

По разделу «Автоматизация технологических процессов и производств»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>Ст. преподаватель кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов</b>	<b>Ю.К. Агрошенко</b>	-		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>ст. преподаватель кафедры атомных и тепловых электростанций</b>	<b>М.А.Вагнер</b>	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>атомных и тепловых электростанций</b>	<b>А.С. Матвеев</b>	<b>к.т.н., доцент</b>		

Томск – 2016 г.

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

---

Институт Электронного обучения  
Специальность подготовки **140101 Тепловые электрические станции**  
Кафедра «Атомных и тепловых электростанций»

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН  
\_\_\_\_\_ А.С. Матвеев  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>дипломного проекта</b>
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

Студенту:

Группа	ФИО
3-6301	Мотвиевский Александр Сергеевич

Тема работы:

<b>Проект реконструкции котла БКЗ-210-140 ст. №13 Бийской ТЭЦ</b>
Утверждена приказом директора (директора) (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	
(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; экономический анализ и т.д.).	Объект проектирования – паровой котел БКЗ-210-140 ст. №13 Бийской ТЭЦ. Режим работы – непрерывный. Климатические условия – г. Бийск. Топливо – каменный уголь, мазут М-100. Параметры острого пара: давление – 14 МПа температура – 545 °С

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Произвести анализ эффективности работы котлов БКЗ-210-140 на Бийской ТЭЦ.</li> <li>2. Сформулировать цели и задачи проектирования.</li> <li>3. Представить тепловую схему Бийской ТЭЦ с описанием основного и вспомогательного энергетического оборудования и их техническими характеристиками.</li> <li>4. Исследовать проблемы, связанные со сжиганием на действующем котле непроектного топлива и разработать мероприятия, обеспечивающие его надежную работу.</li> <li>5. Выполнить тепловой расчет котла на непроектное топливо.</li> <li>6. Выполнить расчет системы пылеприготовления</li> <li>7. Обосновать технико-экономическую целесообразность проекта.</li> <li>8. Проанализировать проектируемое оборудование, рабочие места на предмет выявления основных опасностей и вредностей, оценить степень воздействия их на человека и природную среду.</li> <li>9. Провести анализ полученных результатов проектирования, дать рекомендации по их практическому использованию.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Компоновка главного корпуса. Конструкция и общий вид котла БКЗ-210-140. Схема системы пылеприготовления, характеристики и показатели работы.</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Раздел</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Консультант</b></p>
<p>Введение</p>	<p>Ассистент кафедры АТЭС Мартышев В.Н.</p>
<p>1. Краткая характеристика ТЭЦ</p>	<p>Ассистент кафедры АТЭС Мартышев В.Н.</p>
<p>2. Анализ способов повышения экономичности и надежности ТЭЦ</p>	<p>Ассистент кафедры АТЭС Мартышев В.Н.</p>
<p>3. Тепловой расчет котла</p>	<p>Ассистент кафедры АТЭС Мартышев В.Н.</p>
<p>4. Расчет тракта рециркуляции дымовых газов</p>	<p>Ассистент кафедры АТЭС Мартышев В.Н.</p>
<p>5. Расчет системы пылеприготовления</p>	<p>Ассистент кафедры АТЭС Мартышев В.Н.</p>
<p>6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент кафедры менеджмента Фигурко А.А.</p>
<p>7. Компонентные решения установки нового оборудования</p>	<p>Ассистент кафедры АТЭС Мартышев В.Н.</p>
<p>8. План мероприятий по переводу котла БКЗ-210-140 на сжигание непроектного угля марки «Д»</p>	<p>Ассистент кафедры АТЭС Мартышев В.Н.</p>
<p>9. Социальная ответственность</p>	<p>Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Сечин А.А.</p>
<p>Заключение</p>	<p>Ассистент кафедры АТЭС Мартышев В.Н.</p>
<p><b>Название разделов, которые должны быть написаны на русском языке:</b></p>	
<p>Введение</p>	
<p>1. Краткая характеристика ТЭЦ</p>	
<p>2. Анализ способов повышения экономичности и надежности ТЭЦ</p>	
<p>3. Тепловой расчет котла</p>	
<p>4. Расчет тракта рециркуляции дымовых газов</p>	
<p>5. Расчет системы пылеприготовления</p>	
<p>6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	
<p>7. Компонентные решения установки нового оборудования</p>	

8. План мероприятий по переводу котла БКЗ-210-140 на сжигание непроектного угля марки «Д»
9. Социальная ответственность
Заключение

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	<b>20 февраля 2016 года</b>
---	-----------------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры АТЭС	Мартышев В.Н.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6301	Мотвиевский Александр Сергеевич		

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



Институт	<b>Электронного обучения</b>
Направление подготовки (специальность)	<b>140101 Тепловые электрические станции</b>
Уровень образования	<b>Специалист</b>
Кафедра	<b>Атомных и тепловых электростанций</b>
Период выполнения	весенний семестр 2016 учебного года

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-6301	Мотвиевский Александр Сергеевич

Тема работы:

<b>Проект реконструкции котла БКЗ-210-140 ст. №13 Бийской ТЭЦ</b>	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	

Форма представления работы:

<b><i>Дипломный проект (работа)</i></b> (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)
---

**ЗАДАНИЕ**

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Капиталовложения на реконструкцию ТЭЦ на основе полученных ответов заводов-изготовителей (Согласно предварительным сводно-сметным расчетам завода-изготовителя).</li> <li>2. Удельные расходы условного топлива, количество отпущенного тепла и электроэнергии (Согласно данным ПТО ОАО «Бийскэнерго»).</li> <li>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений (Согласно действующему Налоговому Кодексу РФ).</li> </ol>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Капитальные затраты на реконструкцию ТЭЦ.</li> <li>2. Эксплуатационные издержки до реконструкции станции, и при эксплуатации станции на непроектном топливе.</li> <li>3. Экономическая эффективность ТЭЦ.</li> </ol>

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	А.А. Фигурко	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6301	Мотвиевский Александр Сергеевич		

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



Институт	<b>Электронного обучения</b>
Направление подготовки (специальность)	<b>140101 Тепловые электрические станции</b>
Уровень образования	<b>Специалист</b>
Кафедра	<b>Атомных и тепловых электростанций</b>
Период выполнения	весенний семестр 2016 учебного года

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-6301	Мотвиевский Александр Сергеевич

Тема работы:

<b>Проект реконструкции котла БКЗ-210-140 ст. №13 Бийской ТЭЦ</b>	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	

Форма представления работы:

<b><i>Дипломный проект (работа)</i></b>
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**ЗАДАНИЕ**

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	<p>1. <i>Описание рабочего места на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>вредных проявлений факторов производственной среды (освещение, шумы, вибрации )</i></li> <li>– <i>опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</i></li> <li>– <i>негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</i></li> </ul> <p>-- <i>чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</i></p> <p>2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>
--	---

<p><b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b></p>	<p>1. Анализ выявленных <b>вредных</b> факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико – химическая природа фактора, его связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека ;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (с ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul> <p>2. Анализ выявленных <b>опасных</b> факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения);</li> </ul> <p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> </ul> <p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>
<p><b>Перечень расчётного и графического материала</b></p>	<p>Расчет искусственного заземления. Рисунок расположения заземлителей в грунте.</p>

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры экологий и безопасности жизнедеятельности	А.А. Сечин	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6301	Мотвиевский Александр Сергеевич		

## РЕФЕРАТ

Дипломный проект 182 страницы, 11 рисунков, 8 таблиц, 20 источников, 5 приложений, 6 листов графического материала.

ТЕПЛОВАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ, КОТЕЛ, ПЫЛЕСИСТЕМА, СХЕМА АВТОМАТИКИ И КИПА.

Объектом исследования является котел типа БКЗ-210-140.

Цель работы – перевод котлов БКЗ-210-140 на сжигание угля марки «Д».

В процессе работы выполнен тепловой расчет котла на непроектное топливо, расчет системы пылеприготовления расчет нового оборудования, технико-экономические расчеты, проведен обзор социальной ответственности при работах в котельном цехе.

Так же показана эффективность перехода на непроектное топливо, способы повышения надежности работы котлов, пылесистем.

Технико-экономические расчеты показали высокую эффективность предлагаемой модернизации.

Пояснительная записка выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2007, чертежи в графических редакторах Компас и Автокад.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	11
1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЭЦ	13
2. СПОСОБОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТЭЦ	27
3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЛА	29
3.1 Исходные данные	29
3.2 Основные характеристики котла	29
3.3 Расчетные теплотехнические характеристики топлива	31
3.4 Анализ результатов теплового расчета котла	34
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	36
5. КОМПОНОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УСТАНОВКИ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	42
6. ПЛАН МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПЕРЕВОДУ КОТЛА БКЗ-210-140 НА СЖИГАНИЕ НЕПРОЕКТНОГО УГЛЯ МАРКИ «Д»	43
7. РАЗРАБОТКА АСР УРОВНЯ ВОДЫ В БАРАБАНЕ КОТЛА	45
8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	54
9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	67
ПРИЛОЖЕНИЕ А Тепловой расчет котла	69
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчет системы пылеприготовления	163
ПРИЛОЖЕНИЕ В Расчет тракта рециркуляции	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Спецификация приборов и средств автоматизации	179

Графический материал:

ФЮРА. 693100.007 МЧ	На отдельном листе А1
Компоновка главного корпуса I-III очереди	На отдельном листе А1
ФЮРА. 693100.002 ВО	На отдельном листе А1
Продольные разрезы котла БКЗ-210-140	На отдельном листе А1
ФЮРА. 693100.003 ВО	На отдельном листе А1
Поперечные разрезы котла БКЗ-210-140	На отдельном листе А1
ФЮРА.693100.004 Г	На отдельном листе А1
Схема системы пылеприготовления	На отдельном листе А1
ФЮРА.693100.005 МЧ	На отдельном листе А1
Трубопроводы инертных газов	На отдельном листе А1
ФЮРА.421000.006 С2	На отдельном листе А1
АСР уровня воды в барабане	На отдельном листе А1

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

## ВВЕДЕНИЕ

Тепловые электрические станции на твердом топливе играют важную роль в обеспечении потребности восточных регионов нашей страны в электрической и тепловой энергии. Однако в последние 15-20 лет значительная часть этих ТЭС вынуждена сжигать топливо ухудшенного качества, а иногда и вовсе непроектное топливо. Это связано как с исчерпанием запасов ряда месторождений качественного энергетического угля, так и с заметным ростом цен на эти виды топлива.

Сжигание в котлах угля ухудшенного качества или непроектного топлива приводит к работе в нерасчетных режимах, как основного, так и вспомогательного оборудования ТЭС, как правило с ухудшением КПД и, соответственно, удельных расходов топлива. Повышаются эксплуатационные издержки и затраты на ремонт оборудования, снижается общая надежность станции. При работе на этих углях ухудшаются экологические показатели ТЭС, возрастают платежи за загрязнение окружающей среды.

Одним из путей решения этой проблемы является реконструкция котлов для работы на другом угле, но в расчетном режиме и с приемлемым КПД.

Следует отметить, что в последние годы, — в условиях рынка, появилась возможность выбирать наиболее эффективное топливо для электростанций, для чего следует оценить сравнительную эффективность использования углей с разными свойствами (теплотой сгорания, влажностью, зольностью, абразивностью угля и его золы и пр.) и экономическую целесообразность перевода конкретной ТЭС на сжигание тех или иных углей.

Одним из возможных вариантов изменения топливного режима Бийской ТЭЦ является перевод ее на сжигание Кузнецких углей марки «Д». Эти угли в целом имеют неплохие качественные показатели, а по некоторым параметрам даже превосходят проектное топливо – Кузнецкие угли марки СС, но они имеют ограниченное использование в тепловой энергетике ввиду высокой реакционности. Выход летучих на горючую массу у углей марки «Д» превышает 40%, что предопределяет их высокую взрывопожароопасность. Тем не менее, при вполне определенных условиях сжигание этих углей возможно в энергетических котлах. В первую очередь – это

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

реконструкция пылесистем котлов с переводом на газовую сушку топлива, реализация ряда дополнительных мероприятий по обеспечению взрывопожаробезопасности ТЭС и, безусловно, обеспечение высокой культуры эксплуатации ТЭС.

В силу ограниченного спроса, угли марки «Д», по состоянию на сегодняшний день, на 15% дешевле марки «СС», что, возможно, обеспечит определенный экономический эффект при переводе ТЭЦ на их сжигание.

Целью данной работы является исследование технической возможности работы котлов БКЗ-210-140 Бийской ТЭЦ на углях марки «Д», объема необходимой реконструкции котлов и вспомогательного оборудования, оценка экономической эффективности и инвестиционной привлекательности данного проекта.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

## 1 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЭЦ

Официальным вводом ТЭЦ в строй действующих электростанций считается 31 мая 1957 года.

30 декабря 1992 года зарегистрировано Акционерное общество (АО) «Бийская ТЭЦ-1»

В 1994 году создано Акционерное общество закрытого типа «Бийскэнерго» в соответствии с законом РФ «О предприятиях и предпринимательской деятельности».

АОЗТ создано в целях эффективного управления капиталом акционеров и прибылью, полученной от производственной деятельности АООТ «Бийская ТЭЦ-1» для обеспечения получения максимальной прибыли в интересах его участников.

В соответствии с Федеральным законом «Об акционерных обществах» от 26.12.95г и решения собрания акционеров АООТ «Бийская ТЭЦ-1» от 15.03.96г. протокол № 7 название «Акционерное общество открытого типа «Бийская ТЭЦ-1» изменено на название «Открытое акционерное общество «Бийская ТЭЦ-1».

Решением арбитражного суда Алтайского края от 2 августа 2000 года ОАО «Бийская ТЭЦ-1» признано банкротом и открыто конкурсное производство. 12 октября 2000г. заключен договор, согласно которому имущество ОАО «Бийская ТЭЦ-1» передано в аренду ОАО «Бийскэнерго», которое в дальнейшем осуществляет производство и поставку электрической и тепловой энергии.

В декабре 1990 года пущен в эксплуатацию котел ТПЕ–430А ст.15 производительностью 500 тонн пара в час, в марте принят в эксплуатацию турбоагрегат ст.№ 8 мощностью в 110 МВт, благодаря чему установленная мощность ТЭЦ составила 535 МВт.

В 2001 году в эксплуатацию был сдан котел ТПЕ – 430 ст.№16 производительностью 500 тонн пара в час, произошло увеличение паровой мощности до 4170 тонн, и тем самым завершено расширение ТЭЦ.

Общая установленная мощность 535 МВт.

Установленная тепловая мощность турбин 1113,5 Гкал/час.

Принципиальная тепловая схема станции приведена на рисунке 1.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

ТЭЦ обеспечивает потребителей г.Бийска, соседних городов Горного Алтая и сельских районов электроэнергией, а также город и его промышленные предприятия теплом.

Энергоснабжением потребителей производится электроэнергией трех напряжений: 6, 35 и 110 кВ.

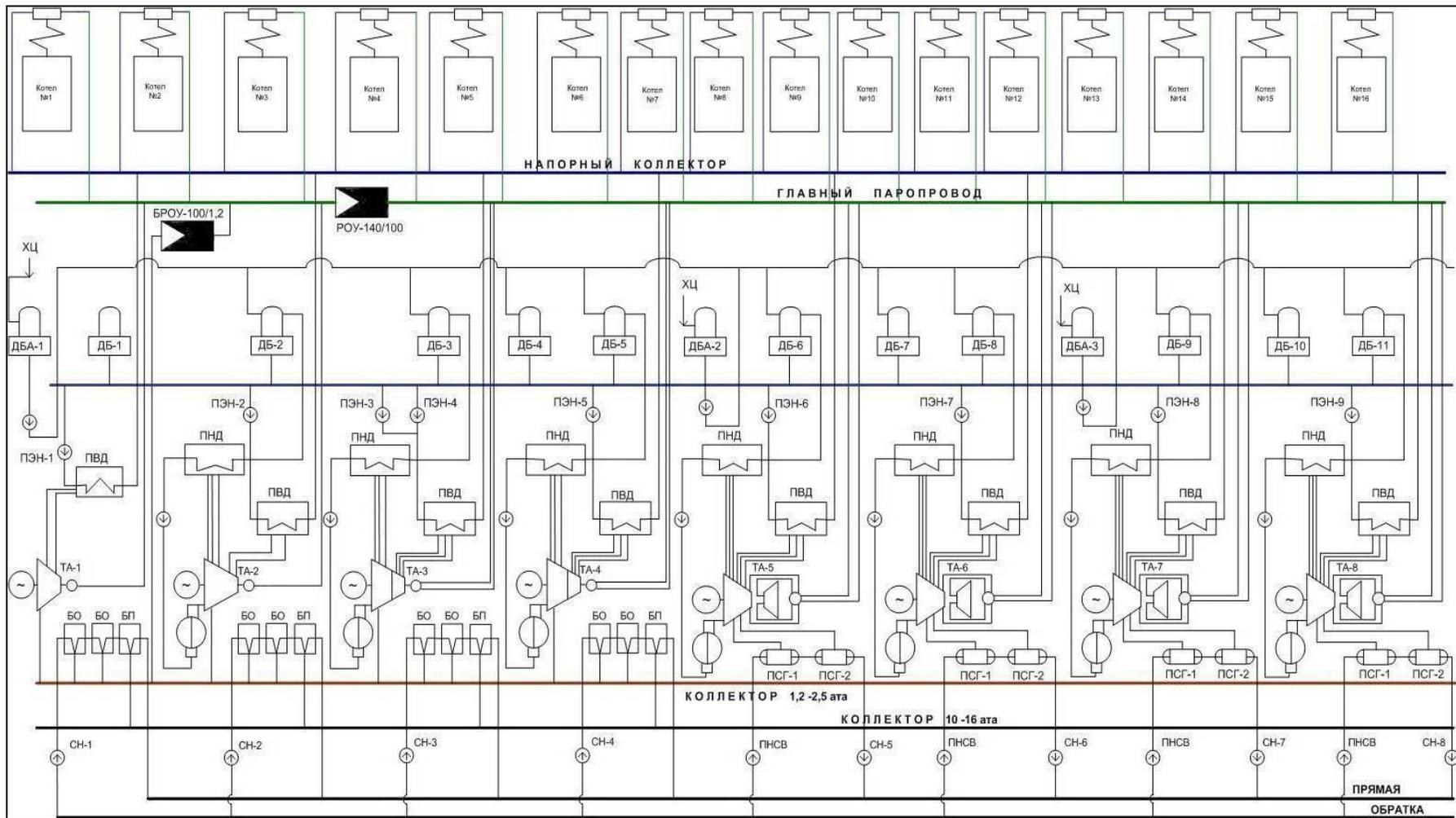
Связь с объединенной энергосистемой Сибири осуществляется по линиям 110 кВ.

ТЭЦ отпускает тепловую энергию потребителям в виде пара с параметрами:  $P=11$  ата,  $t = 260$  °С и в виде горячей воды по температурному графику 150/70°С со срезкой на 130°С.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Изм.  
Лист  
№ докум.  
Подпись  
Дата

Рисунок 1 - Принципиальная тепловая схема ТЭЦ ООО "Бийскэнерго" [1]



ФЮРА 311085.001.ПЗ

Лист  
15

## 1.1 Вспомогательные цеха электростанции

### 1.1.1 Химический цех

Производительность обессоливающей установки - 720 т/ч.

Обессоливающая установка работает по схеме:

1. Предочистка в составе: коагуляция сернокислым железом и известкование.
2. Механическая фильтрация.
3. Н-катионирование по блочной схеме.
4. Анионирование на основе анионита АВ-17.

В качестве воды для данной схемы используется речная вода.

Подготовка подпиточной воды для тепловых сетей осуществляется на ХВО производительностью 2700 т/час по схеме «водород – катионирование», декарбонизация.

### 1.1.2 Топливо-транспортный цех

Основные составляющие топливо-транспортного цеха:

- дробилки молотковые ДМ 20/21 (1 шт.) и ДМ 20/20 (1 шт.) - производительностью 600 т/ч каждая;
- дробилки СМД-98Б (2 шт.) производительностью 1500 т/ч. каждая;
- кран “КРАФ” - грузоподъемность 32т;
- вагоноопрокидыватель ВРС-125 (2 шт.);
- бульдозер Т-130-170 (7 шт.), Т-180 (1 шт.), Т-330 (3 шт.);
- тепловозы ТГМ-6 (1 шт.), ТГМ-4 (2 шт.);
- размораживающее устройство типа “Инфрасиб”;
- конвейера разной производительности (15 шт.)

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

## 1.2 Особенности конструкции и характеристики основного оборудования

ТЭЦ - электростанция высокого давления с поперечными связями, имеющая в своем составе две группы оборудования: 90 и 130 ата.

### 1.2.1 Турбинный цех

Таблица 1.2 - Турбины

Станционный номер, ст.№	Тип	Установленная мощность, МВт	Тип генератора
1	ПТ-25-90	25	ТВ-2-30-2
2	Т-30-90	30	ТВ-2-30-2
3,4	ПТ-50-130/13	50	ТВФ-60-2
5	Т-50-130	50	ТВФ-60-2
6,7,8	Т-110-130	110	ТВФ-110-2

### 1.2.2 Котельный цех

Основные характеристики всех котлов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Котлы

Станционный №	Тип	Производительность по перегретому пару, т/ч	Температура перегретого пара, °С	Давление перегретого пара на выходе, МПа
1, 2, 3	ТП-170	170	510	100
4, 5, 6, 7, 8, 9	БКЗ-210-140ф	210	550	140
10, 11, 12, 13	БКЗ-210-140-7	210	560	140
14, 15, 16	ТПЕ-430-А	500	560	140

В настоящее время на котлы ст. 1 - 6 наложен запрет на эксплуатацию в силу износа и полного выработки их паркового ресурса и ольшого физического износа.

Котельный агрегат типа ТПЕ-430А (котлы №№14, 15, 16) однобарабанный, вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией предназначен для полу-

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

чения перегретого пара при сжигании кузнецкого угля марки «СС» и оборудован средствами автоматического регулирования, технологических защит и сигнализации.

Номинальные значения основных параметров котла:

- производительность по перегретому пару - 500 т/ч;
- температура перегретого пара - 560 °С;
- давление перегретого пара на выходе - 140 МПа;
- температура питательной воды - 230°С;
- КПД котла 90 %.

Компоновка котлоагрегата выполнена по П-образной схеме и состоит из топочной камеры и опускного газохода, соединенных в верхней части горизонтальным газоходом. Топочная камера открытого типа с твердым шлакоудалением предназначена для сжигания отсевов кузнецких углей марки СС.

Все стены топочной камеры, горизонтального и опускного газоходов выполнены из газоплотных панелей, котел работает на уравновешенной тяге. В топочной камере расположены испарительные экраны и радиационный пароперегреватель, над топкой и в горизонтальном газоходе расположен потолочный пароперегреватель, на выходе из топки один ряд ширм, в горизонтальном газоходе – две ступени конвективного пароперегревателя, в опускном газоходе расположен водяной экономайзер. После водяного экономайзера газоход разделяется на две части и газы подаются в два регенеративных воздухоподогревателя, затем в золоулавитель, на всас дымососа и в дымовую трубу.

Топочная камера имеет призматическую. Все экраны топочной камеры секционированы на циркуляционные контуры по числу входящих в них панелей. Всего на котле 32 циркуляционных контура. По 10 контуров циркуляции имеется на фронтном и заднем экранах и по 6 на боковых экранах.

В нижней части топки трубы фронтного и заднего экранов образуют «холодную воронку». Угол наклона труб в «холодной» воронке 55 градусов.

Топочная камера оборудована восьмью пылеугольными, вихревыми, лопаточно-лопаточными горелками мощностью 36 МВт для сжигания Кузнецких ка-

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		18

менных углей марки «СС» с выходом летучих 13-20 % - установленных на фронтальной и задней стенах, по четыре горелки на каждой стене.

Краткое описание:

По способу закручивания воздуха горелка является лопаточно-лопаточной - типа ГЛЛ.

Для канала вторичного воздуха и канал центрального воздуха снабжены аксиальными нерегулируемыми лопаточными завихрителями. Сопло ПВКд установлено в центре горелки непосредственно в ее устье, что обеспечивает за счет приосевого обратного тока топочных газов интенсивный прогрев пыли с выделением летучих и зажиганием факела в обедненной кислородной среде. Между центральным каналом и внутренним каналом вторичного воздуха предусмотрен кольцевой малопроточный канал, позволяющий исключить активное перемешивание концентрированной аэросмеси с вторичным воздухом на начальном участке факела, что также способствует более интенсивному прогреву пыли, выделению летучих и улучшению условий воспламенения. В центральном канале воздуха горелки помимо трубы ПВКд с раскателем устанавливается мазутная форсунка, запальник, фотодатчик и лючок обслуживания. На подводе в канал центрального воздуха и внешний канал вторичного воздуха предусмотрена установка регулировочных шиберов, которые позволяют подавать воздух при работе на пыли и поддерживать за счет этого нормальные скорости и параметры крутки во внутреннем канале вторичного воздуха при снижении нагрузки котла без снижения устойчивости воспламенения и горения пыли.

Для растопки котла на мазуте предназначены плоскофакельные паромеханические форсунки типа «Веер» со следующими характеристиками:

производительность  $D_n = 1,5$  т/ч

давление мазута максимальное  $P_m = 2,4$  МПа (24 кгс/см<sup>2</sup>)

давление пара  $P_p = 1,0; 1,6$  МПа (10-16 кгс/см<sup>2</sup>)

Барабан, установленный на двух роликовых опорах имеет внутренний диаметр 1600 мм, толщиной стенки 112 мм., длину 20000 мм.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		19

На котле применена одноконтурная схема питания. Узел регулирования питания состоит из измерительной диафрагмы и арматуры с условным  $D$  250 мм, в которую входят задвижка с электроприводом, регулирующий клапан, обратный клапан и общая на узел задвижка с электроприводом. Регулирующий клапан и задвижка байпасируются двумя линиями с условным проходом  $D_u$  100мм и  $D_u$  65 мм. Байпас  $D_u$  100 мм состоит из регулирующего поворотного клапана и задвижки с электроприводом. Байпас  $D_u$  65 состоит из регулирующего поворотного клапана с электроприводом, вентиля с электроприводом и дроссельного устройства. По этой линии в растопочных режимах подается питательная вода. Байпас  $D_u$ -100 предназначен для работы котла при сниженных нагрузках.

Для подогрева воздуха до заданной температуры котел оснащен двумя регенеративными воздухоподогревателями типа РВП-68, представляющий собой теплообменный аппарат для подогрева воздуха за счет тепла дымовых газов осуществляемого путем нагрева набивки ротора в газовом потоке и ее охлаждения в воздушном потоке. Перемещается набивка из газового потока в воздушный вращением ротора со скоростью 2 об/мин.

Для ограждения потолочного пароперегревателя соединительных труб и коллекторов пароперегревателя, камер экранов впрыскивающих пароохладителей 2 и 3 ступени от воздуха котельного цеха над топкой, переходным газоходом и опускной шахтой смонтирован теплый ящик (шатер). Теплый ящик представляет собой щитовую газоплотную металлоконструкцию из теплоустойчивой стали с теплоизоляцией, нанесенной по наружной поверхности. Сквозь теплый ящик проходят подвески, на которых подвешены за камерой все экранные поверхности нагрева, настенные ограждения переходного газохода и конвективной шахты, ширмовые пароперегреватели, экономайзер, теплоизоляция котла, а также площадки, помосты и лестницы котла. Температура воздуха в теплом ящике поддерживается на уровне 400-450 °С за счет тепловыделения неизолированными поверхностями нагрева.

На котле для удаления шлака смонтированы 4 механизированные установки непрерывного шлакоудаления со шнековыми транспортерами, состоящими из

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		20

следующих узлов: шлаковый бункер с гарнитурой и деталями крепления, шнековый транспортер с приводом. Производительность одной установки 7 т/ч.

Поток газов, выходя из топки, последовательно омывает поверхности нагрева ширмового и конвективного пароперегревателей в переходном газоходе и поступает в опускной газоход в ВЭ. За ВЭ поток газов делится на два и газу направляются в два РВП-68. С целью повышения эффективности работы электрофильтров предусмотрено охлаждение дымовых газов, выходящих из РВП до 110 °С с системой кондиционирования, путем подачи холодного воздуха и распыленной воды в газовый поток. В газовый поток за РВП осуществляется также сброс горячего воздуха по воздухопроводам из теплого ящика (шатра). Кондиционированные дымовые газы направляются в электрофильтр типа ЭГА-2-76-12-6-4 и два основных дымососа ДН-26/2-0,62 и направляются в дымовую трубу. Перед ДС на каждом газоходе установлены по одному плотному клапану, а за дымососом смонтирована отключающая заглушка на случай выхода ДС в ремонт. Производительность ДС с 10 % запасом составляет 495000 м<sup>3</sup>/час. Полный напор, развиваемый ДС с 20 % запасом при температуре дымовых газов 133 °С составляет 3496 Па (349,6 мм.в/ст.). За ДС производятся отборы холодных дымовых газов для присадки их к горячим топочным газам, забираемых из топки в систему пылеприготовления. На двух линиях холодных дымовых газов установлены по дымососу ДН-11,2 и плотные клапаны перед и за ними (ДИГи). Нагнетательные линии холодных газов соединены между собой перемычкой, на которой установлен плотный клапан. Из нагнетательного газопровода холодных газов производится отбор газов для охлаждения сбросных горелок.

На котельном агрегате установлено два дутьевых вентилятора (ДВ) типа ВДН-26П-У для подачи воздуха в котел. Производительность ДВ 290000 м<sup>3</sup>/час. Полный напор при температуре рабочей среды 30°С 4520 Па (452 мм.в/ст.). Забор холодного воздуха производится из верхней части котельного цеха, холодный воздух поступает на всас ДВ и направляется по воздухопроводам в РВП. На входе и выходе РВП установлены плотные клапаны для отключения РВП при аварийном останове. За РВП воздухопроводы горячего воздуха раздваиваются и образу-

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

ют кольцо горячего воздуха котла, на котором установлено 4 плотных клапана. Из кольца горячего воздуха воздух подается в основные и сбросные горелки, все горелки могут быть отключены по отдельности от кольца клапанами. Для повышения температуры воздуха на входе в РВП до 50 °С и уменьшения налипания золы на набивки РВП предусмотрена линия рециркуляции горячего воздуха (РГВ) на всас ДВ.

Котельный агрегат оборудован двумя индивидуальными полуразомкнутыми системами пылеприготовления с промбункером. Регулирование подачи топлива осуществляется путем изменения числа оборотов электродвигателя постоянного тока ПСУ. По газозаборной шахте из верха топки котла и газопровода холодных газов поступает смесь топочных и холодных газов в мельницу для сушки и транспортирования топлива. После мельниц пылегазовая смесь поступает в сепараторы, где пыль отделяется от более крупной фракции, более крупная фракция угля возвращается в ШБМ на доразмол, а угольная пыль направляется в пылевые циклоны ЦП-2, где разделяется на пыль и сушильный агент. Угольная пыль из циклона по течке с мигалками поступает в бункер пыли. Сушильный агент по пылепроводу с установленным на нем загрузочном шибере поступает на всас мельничного вентилятора (МВ) и затем по пылепроводам сбрасывается в топку через сбросные горелки. Угольная пыль из бункера подается с помощью системы ПВКД в топку котла.

Котельный агрегат типа БКЗ-210-140 (котлы №7 - №13) однобарабанный вертикально-водотрубный с естественной циркуляцией, при сухом шлакоудалении, предназначен для сжигания кузнецкого каменного угля марки СС и Т первой группы окисленности.

Котел спроектирован для работы со следующими параметрами:

- производительность по перегретому пару – 210 т/ч;
- давление пара в барабане 152-159 кгс/см<sup>2</sup>;
- давление перегретого пара за паровой задвижкой – 140 кгс/ см<sup>2</sup>;
- температура питательной воды – 230°С;
- температура перегретого пара – 540°С;

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

Компоновка котлоагрегата выполнена по П-образной схеме. Топочная камера представляет собой первый восходящий газоход, вверху (поворотном газоходе) расположен пароперегреватель, во втором (нисходящем) газоходе расположен водяной экономайзер и воздухоподогреватель.

Водяной объем котла составляет 62,7 м<sup>2</sup>, паровой объем – 32,00 м<sup>2</sup>.

Топочная камера открытого типа, призматической формы: полностью экранирована трубами 60x5,5 сталь 20 с шагом 64 мм. Экранная система разделена на 14 самостоятельных контуров. Фронтальной и задней экран в нижней их части образуют скаты «холодной воронки». Верх топки экранирован трубами потолочного пароперегревателя. В верхней части топки трубы заднего экрана образуют аэродинамический козырек, который предназначен для улучшения аэродинамики газового потока на выходе из топки и для частичного затенения ширм пароперегревателя. Объем топочной камеры составляет 1042,75 м<sup>3</sup>.

Топочная камера оборудована четырьмя пылеугольными горелками, расположенными на боковых стенах. Для растопки котла предусмотрены мазутные форсунки парового распыления, встроенные в пылеугольные горелки. Производительность одной форсунки 1050 кг/ч, давлением мазута 4-5 кгс/см<sup>2</sup>, давлением пара 10-16 кгс/см<sup>2</sup>.

Котел имеет один сварной барабан внутренним диаметром 1600 мм. толщиной стенки 115 мм.

Пароперегреватель котла по характеру восприятия тепла радиационно-конвективного типа. Радиационную часть перегревателя образуют трубы потолка, закрывающие верх топки и поворотного газохода. Полурадиационной частью пароперегревателя являются ширмы, расположенные на выходе из топки с шагом по ширине 560 мм. Конвективные поверхности пароперегревателя расположены к поворотным горизонтальным газоходам с шагом труб по ширине 80 мм. По ходу движения пара 1 ступень пароперегревателя – противоточная, остальные – прямоточные.

Конвективная шахта представляет собой опускной газоход котла с размещением в нем в рассечку водяным экономайзером и воздухоподогревателем. II ступень

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		23

пень (по ходу воды) водяного экономайзера занимает всю глубину газохода, после чего шахта разделяется на два симметричных газохода, где последовательно размещена II ступень воздухоподогревателя (по ходу воздуха), I ступень водяного экономайзера и I ступень воздухоподогревателя.

Для удаления шлака из-под топки предусмотрена установка непрерывного механизированного шлакоудаления, которое состоит из следующих узлов: шлаковая шахта с гарнитурой и деталями крепления, шнековой транспортер, привод шнекового транспортера.

На котле применена одноконтурная система питания. Сниженный узел регулировки питания состоит из основного регулирующего клапана с условным диаметром 225 мм и двух байпасов с регулирующим клапаном условных диаметров 100 мм, 50 мм. Байпас Ду-50 включается при повышении параметров при растопке котла, байпас Ду-100 предназначен для работы при сниженных нагрузках.

Котельный агрегат оборудован двумя индивидуальными, замкнутыми системами пылеприготовления с промежуточным бункером .

Угольная пыль в топку подается при помощи системы ПВКД. При данном способе подачи пыли к горелкам котла, пыль подается сжатым воздухом от воздухоудовки при высокой ее концентрации в пылепроводе.

Котельный агрегат оборудован двумя дутьевыми вентиляторами типа ВДН-2ОПУ с характеристикой при рабочем режиме производительностью с запасом 8% - 109000 м<sup>3</sup>/ч, полный напор при температуре рабочей среды 30 °С и указанной производительности 412 кгс/м<sup>2</sup> ,число оборотов 980/740 об/мин. (1-я, 2-я скорость).

Для отсоса дымовых газов на котле установлено два дымососа типа Д20х2 с характеристикой при рабочем режиме производительность с запасом 5 % - 168000м<sup>3</sup>/ч, полный набор при температуре рабочей среды 80 °С и указанной производительностью 26 кгс/м<sup>2</sup> , число оборотов 750 об/мин. Регулирование производительности дымососа осуществляется направляющим аппаратом шиберного типа.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

Для очистки дымовых газов от золы предусмотрена золоулавливающая установка типа МП-ВТИ диаметр 2500, состоящая из 4-х мокрых золоуловителей.

### 1.2.3 Электрический цех

Электрическая схема ОАО “Бийскэнерго” включает в себя генераторы, трансформаторы связи, закрытые распределительные устройства на напряжение 110 кВ, 35 кВ (ЗРУ), главное распределительное устройство напряжением 6 кВ (ГРУ), распределительные устройства собственных нужд 6 кВ трансформаторы отпайки, трансформаторы собственных нужд, коммутационные аппараты и другое электрооборудование, необходимое для поддержания работоспособности, как отдельных элементов, так и станции в целом..

Генераторы №1 и №2 подключены к ГРУ- 6 кВ, с шин которого осуществляется питание собственных нужд ТЭЦ и питание промышленных предприятий.

Связь ГРУ–6 кВ с ЗРУ–35 кВ осуществлена с помощью повышающих трансформаторов связи №1 и №2.

С распределительного устройства 35 кВ по ЛЭП: 3Ц, 5Ц, 7Ц осуществляется питание промышленных предприятий.

Генераторы №3 и №4 связаны с ЗРУ- 35 кВ и ЗРУ–110 кВ посредством трехобмоточных трансформаторов связи №3 и №4.

Генераторы №5, №6, №7 через повышающие трансформаторы связи №5, №6, №7, соответственно, связаны с ЗРУ- 110 кВ.

С распределительного устройства U= 110 кВ запитаны ЛЭП: ТС-169, ТС-170, БТ- 105, БТ-106 посредством которых осуществляется связь электростанции с системой.

Генератор №8 связи со стационарными распределительными устройствами не имеет и мощность, вырабатываемая генератором передается через трансформатор связи №8, повышающий напряжение до 110 кВ, сразу в энергосистему.

Питание электрооборудования собственных нужд станции, работающего на напряжении 6 кВ, осуществляется с РУСН-6 кВ. Количество секций - 18.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

Питание низковольтного оборудования (380 В, 220 В ) осуществляется с РУСН – 0,4 кВ, количество которых составляет 29 .

РУСН – 6 кВ, в свою очередь, запитаны с отпаяк генераторов и ГРУ – 6 кВ.

Все секции собственных нужд, для обеспечения надежного электроснабжения, имеют помимо рабочего питания, еще и резервное, обеспечивающее питание потребителей, в случае пропадания основного питания.

Турбогенератор предназначен для выработки электроэнергии в продолжительном режиме работы, при непосредственном соединении с паровой турбиной на электростанции, расположенной не выше 1000 м над уровнем моря, в районе с умеренным климатом в помещении с температурой окружающего воздуха в пределах от 5 до 40°С.

#### 1.4 Общая характеристика технического водоснабжения

Система технического водоснабжения ОАО "Бийскэнерго" прямоточная с забором холодной воды на охлаждение оборудования из р. Бия и сбросом теплой воды обратно в реку.

Вода из реки поступает в водозаборный ковш с низовым питанием расчетной производительностью 50 тыс. м<sup>3</sup>/ч, а затем в водоприемник, оборудованный двумя водоочистными машинами типа ТВ-3000 с внутренним подводом воды.

Теплая вода после охлаждения конденсаторов турбин по водоводам направляется в закрытые железобетонные каналы и далее по открытому водоотводящему каналу сбрасывается в р. Бия. Открытый канал сопрягается с руслом реки с помощью консольного сброса. Сброс расположен примерно в 200 м ниже входа в водозаборный ковш. Для предотвращения подсоса теплой воды при низких горизонтах воды построена камненабросная струенаправляющая дамба длиной 120 м, затапливаемая при паводках.

Для приготовления сетевой воды используется речная вода, обработанная на установке ультрафиолетового обеззараживания в ООО "Бийскэнерго".

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		26

## 2 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТЭЦ

Рассматриваемая в данной работе возможность сжигания углей «Д» предполагает высокую экономическую перспективу. В таблице 2.1 приведены сравнительные характеристики топлива.

Таблица 2.1 сравнительные характеристики углей.

		Проектный уголь марки «СС»	Непроектный уголь марки «Д»
Теплота сгорания низшая рабочая, ккал/кг	$Q_i^r$	5140	5320
Влажность на рабочую массу, %	$W_t^r$	11,2	11,5
Зольность на рабочую массу, %	$A^r$	20,2	15,9
Углерод на рабочую массу, %	$C^r$	57	56,4
Выход летучих на горючую массу, %	$V^{daf}$	20	40,9
Водород на рабочую массу, %	$H^r$	3,1	4
Азот на рабочую массу, %	$N^r$	1,3	1,9
Кислород на рабочую массу, %	$O^r$	6,1	9,9
Сера на рабочую массу, %	$S_{(p+o)}^r$	0,3	0,4
Стоимость тонны, р		1318	1113

Уголь «Д» обладает сравнительно большим выходом летучих, в следствие чего его горение в топке более устойчивое, даже при сниженных нагрузках. Эта характеристика позволяет котлу, работающим на нем, быть более маневренным. Так же хорошая воспламеняемость угля «Д» делает возможным сжигать его с загрубленной тониной помола, а это в свою очередь экономит энергию на пылеприготовление.

Для эффективного использования теплотворной способности непроектного угля требуется провести тепловой расчет котла и выявить целесообразность и необходимость изменения поверхностей нагрева котла.

Для надежной и безопасной работы пылесистемы требуется провести комплекс мероприятий для снижения кислорода как в тракте системы пылеприготовления, так и в бункере пыли. Из расчета в приложении Б видно, сколько нужно инертных газов в смеси с воздухом для полного испарения влаги и поддержания уровня кислорода в системе ниже 17 %. Для того, что бы обеспечить таким количеством инертных газов пылесистему потребуются произвести реконструкцию газового тракта, с возможностью рециркуляции уходящих газов через пылесистему. Проведенный в приложении В расчет тракта рециркуляции дымовых газов показывает, что с этой задачей справятся 2 дымососа инертных газов ВГДН-11,2.

## 3 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЛА

### 3.1 Исходные данные

3.1.1. Котел энергетический высокого давления барабанного типа с естественной циркуляцией. Компоновка поверхностей нагрева котла традиционная – П-образная.

3.1.2. Топка камерная, пылеугольная, открытая с твердым шлакоудалением. Стены топки заэкранированы газоплотными цельносварными мембранными панелями из гладких труб с продольно вваренными проставками.

3.1.3. Пароперегреватель радиационно-конвективного типа. Радиационная часть пароперегревателя расположена на потолке топки, полурadiационные двухзаходные ширмы размещены в выходном газовом окне топки, конвективные ступени – в поворотном газоходе котла.

3.1.4. Низкотемпературные поверхности нагрева представлены стальным змеевиковым экономайзером и трубчатым воздухоподогревателем, скомпонованными по двухступенчатой схеме.

3.1.5. Пылеприготовительная установка с шаровыми барабанными мельницами (ШБМ) и промежуточным бункером. Сушка топлива – смесью горячего воздуха и инертных газов.

### 3.2 Основные характеристики котла

- Паропроизводительность котла  $D_{пе} = 210$  т/ч (58,33 кг/с).
- Давление перегретого пара  $p_{пе} = 14$  МПа.
- Температура перегретого пара  $t_{пе} = 545$  °С.
- Температура питательной воды  $t_{пв} = 230$  °С.
- Давление в барабане  $p_{б} = 15,4$  МПа.
- Непрерывная продувка  $p_{пр} = 5$  %.
- Система пылеприготовления – ШБМ с промежуточным бункером.
- Шлакоудаление – твердое.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		29

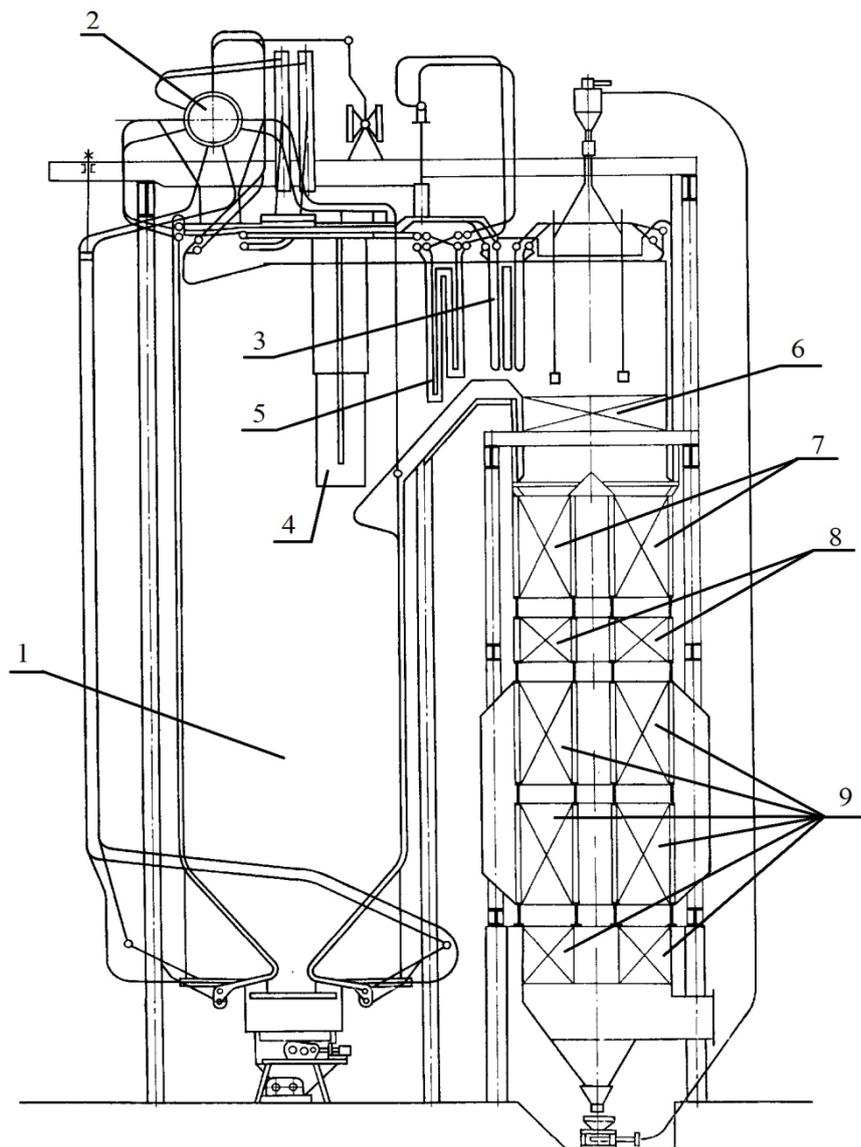


Рисунок 3.1 - Компонка поверхностей нагрева парового котла

- 1 – топка;
- 2 – барабан;
- 3 – конвективный пароперегреватель первой ступени;
- 4 – ширмовый пароперегреватель;
- 5 – конвективный пароперегреватель третьей и четвертой ступени;
- 6 – водяной экономайзер второй ступени;
- 7 – вторая ступень воздухоподогревателя;
- 8 – водяной экономайзер первой ступени;
- 9 – первая ступень воздухоподогревателя.

### 3.3 Расчетные теплотехнические характеристики топлива

3.3.1 Заданное топливо – уголь Кузнецкого бассейна марки Д.

3.3.2 Нормативный элементарный состав заданного топлива в рабочем состоянии [3, табл. I]:

- содержание углерода  $C^r = 56,4\%$ ;
- содержание водорода  $H^r = 4,0\%$ ;
- содержание серы пиритной и органической  $S_{(p+o)}^r = 0,4\%$ ;
- содержание азота  $N^r = 1,9\%$ ;
- содержание кислорода  $O^r = 9,9\%$ ;
- влага рабочего топлива  $W_t^r = 11,5\%$ ;
- зола рабочего топлива  $A^r = 15,9\%$ .

Контрольная сумма для нормативного состава топлива

$$\begin{aligned} C^r + H^r + S_{(p+o)}^r + N^r + O^r + W_t^r + A^r &= \\ &= 56,4 + 4,0 + 0,4 + 1,9 + 9,9 + 11,5 + 15,9 = 100\% \end{aligned} \quad (1)$$

что свидетельствует о правильности принятия нормативного состава топлива.

3.3.3 Низшая теплота сгорания топлива нормативная [3, табл. I]

$$Q_i^r = 21,9 \text{ МДж/кг (21900 кДж/кг)}$$

3.3.4 Выход летучих веществ [3, табл. I]

$$V^{\text{daf}} = 40,5 \%$$

3.3.5 Температурные характеристики золы [3, табл. II]:

$$t_A = 1160 \text{ }^\circ\text{C}, t_B = 1310 \text{ }^\circ\text{C}, t_C = 1440 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3.3.6 Приведенная влажность топлива

$$W_{\text{пр}}^r = W_t^r / Q_i^r = 11,5 / 21,9 = 0,53 \text{ \%} \cdot \text{кг/МДж.} \quad (2)$$

3.3.7 Приведенная зольность топлива

$$A_{\text{пр}}^r = A^r / Q_i^r = 15,9 / 21,9 = 0,73 \text{ \%} \cdot \text{кг/МДж.}$$

3.3.8 Приведенное содержание серы (3)

$$S_{\text{пр}}^r = S_{p+o}^r / Q_i^r = 0,4 / 21,9 = 0,02 \text{ \%} \cdot \text{кг/МДж.} \quad (4)$$

Таблица 3.1 - Объемные характеристики продуктов сгорания, полученные в результате расчета в ПРИЛОЖЕНИИ В

Расчетные формулы	Размерность	Газоходы котла						
		Топка, ширмы	Кпп3,4	Кпп1	Эк2	Вп2	Эк1	Вп1
Коэффициент избытка воздуха за поверхностью $\alpha''_i$	-	1,2	1,215	1,23	1,25	1,28	1,3	1,33
Коэффициент избытка воздуха средний $\alpha_{\text{ср}}$	-	1,2	1,2075	1,2225	1,24	1,265	1,29	1,315
Объем водяных паров $V^H_{\text{H}_2\text{O}}$	м <sup>3</sup> /кг	0,699	0,699	0,701	0,702	0,705	0,707	0,709
Полный объем дымовых газов $V^H_{\Gamma}$	м <sup>3</sup> /кг	7,481	7,527	7,615	7,714	7,861	8,007	8,153
Объемная доля трехатомных газов $r_{\text{RO}_2}$	-	0,142	0,141	0,139	0,137	0,135	0,132	0,13
Объемная доля водяных паров $r_{\text{H}_2\text{O}}$	-	0,093	0,093	0,092	0,091	0,09	0,088	0,087
Объемная доля трехатомных газов и водяных паров $r_n$	-	0,235	0,234	0,231	0,228	0,225	0,22	0,217
Масса дымовых газов $G_2$	кг/кг	9,868	9,928	10,041	10,169	10,357	10,545	10,733
Безразмерная концентрация золовых частиц $\mu_{\text{зл}}$	кг/кг	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,014	0,014

ФЮРА 311085.001.П3

Таблица 3.2 - Энтальпия воздуха и продуктов сгорания, полученные в результате расчета в ПРИЛОЖЕНИИ В (I-9 таблица)

g	I <sub>0Г</sub>	I <sub>0В</sub>	I <sub>зл</sub>	I = I <sub>0Г</sub> + (α'' - 1) · I <sub>0В</sub> + I <sub>зл</sub> ΔI = I <sup>200</sup> - I <sup>100</sup> кДж/кг (кДж/м <sup>3</sup> )															
				α'' <sub>Т=1,2</sub>		α'' <sub>ш=1,2</sub>		α'' <sub>Кпп3,4=1,215</sub>		α'' <sub>Кпп1=1,23</sub>		α'' <sub>Эк2=1,25</sub>		α'' <sub>Вп2=1,28</sub>		α'' <sub>Эк1=1,3</sub>		α'' <sub>Вп1=1,33</sub>	
				I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI	I	ΔI
30	-	229	-																
100	879	764	12														1143	1172	
200	1781	1538	26									2192	1140	2238	1164	2268	1180	2315	1203
300	2712	2321	40									3332	1169	3402	1192	3448	1209	3518	1232
400	3666	3122	54					4391	1174	4438	1187	4501	1203	4594	1228	4657	1244	4750	
500	4648	3946	69			5506	1191	5565	1204	5625	1216	5704	1232	5822	1258	5901			
600	5656	4781	85			6697	1220	6769	1232	6841	1245	6936	1263	7080					
700	6689	5639	100			7917	1240	8001	1253	8086	1266	8199							
800	7740	6503	116	9157	1268	9157	1268	9254	1282	9352									
900	8815	7390	132	10425	1287	10425	1287	10536	1300										
1000	9906	8283	149	11712	1294	11712	1294	11836											
1100	11003	9187	166	13006	1319	13006													
1200	12122	10103	182	14325	1304														
1300	13218	11025	206	15629	1357														
1400	14355	11958	239	16986	1361														
1500	15502	12897	266	18347	1361														
1600	16657	13841	283	19708	1387														
1700	17826	14786	312	21095	1380														
1800	18998	15736	330	22475	1398														
1900	20172	16698	361	23873	1392														
2000	21354	17660	379	25265															

ФЮРА 311085.001.ПЗ

### 3.4 Анализ результатов теплового расчета котла

3.4.1. Коэффициент полезного действия (КПД) рассчитанного котла равен 93,62 %, что выше, чем при работе на угле марки «СС» 93,0 % , что свидетельствует о достаточно высокой экономичности его работы в заданных непроектных условиях.

3.4.2. Топка котла будет работать удовлетворительно, поскольку расчетная температура газов на ее выходе  $\vartheta''_т$ , равная 1049 °С, не превышает рекомендуемой величины по условию предотвращения шлакования ширм, расположенных в выходном окне топки. Расчетное тепловое напряжение топочного объема  $q_v$ , равное 136,5 кВт/м<sup>3</sup>, также не превышает допустимого. Следовательно, процесс горения топлива в топке будет протекать вполне удовлетворительно.

3.4.3. Общая поверхность нагрева пароперегревателя, установленного в котле, такова, что он способен обеспечить перегрев пара до заданной температуры, равной 545 °С.

Что касается расчетных скоростей пара и дымовых газов в отдельных ступенях пароперегревателя, то они достаточно близки к рекомендуемым значениям [2, 3]. Следовательно, проблем, связанных как с заносом, так и износом труб пароперегревателя летучей золой, ожидать не следует.

3.4.4. Экономайзер котла будет работать в некипящем режиме, т. к. расчетная температура воды на его выходе не превышает температуры кипения при выходном давлении. Следовательно, металл труб экономайзера будет хорошо охлаждаться водой даже при небольшой скорости ее движения, равной 0,91 м/с в первой его ступени и 0,72 м/с – во второй. Такие скорости воды обеспечат также должный снос пузырьков воздуха и других газов с внутренней поверхности верхней части труб, что будет замедлять процесс их коррозии.

3.4.5. Расчетные скорости газов в обеих ступенях экономайзера находятся на уровне 6 м/с, что значительно ниже рекомендуемых по нормам [2, 3]. Это обстоятельство существенно не скажется на надежности работы экономайзера, хотя теп-

ловая эффективность работы его поверхностей нагрева на заданном угле будет невысокой, поэтому экономайзер рассчитанного котла желательно реконструировать, уплотнив его змеевики. Такая реконструкция позволит уменьшить габариты экономайзера, снизить его металлоемкость и улучшить условия для проведения ремонтных работ.

3.4.6. Двухступенчатый воздухоподогреватель рассчитанного котла, при его работе на заданном непроектном топливе, обеспечивает нагрев воздуха до температуры 350 °С, которая находится в диапазоне рекомендуемых температур [2, 3] для заданного топлива. Такого нагрева воздуха вполне достаточно для обеспечения должной сушки угольной пыли заданного топлива.

Скорость дымовых газов в первой ступени воздухоподогревателя – 9,23 м/с, во второй – 10,18 м/с. Полученные значения скоростей газов близки к рекомендуемым (10–13 м/с) [2, 3]. При скорости воздуха в первой ступени воздухоподогревателя, равной 3,97 м/с, а во второй – 4,05 м/с, отношение скоростей воздуха к скорости газов находится в диапазоне 0,4–0,43 и отличается от рекомендуемого соотношения этих скоростей (0,5 м/с).

Температура точки росы дымовых газов, при сжигании заданного топлива  $t_p$ , определенная при расчете воздухоподогревателя, – 89,6 °С. Она выше минимальной температуры стенки труб воздухоподогревателя  $t_{ст}^{min}$ , равной 55 °С. На этом основании можно заключить, что при работе котла на заданном топливе не исключена вероятность низкотемпературной коррозии воздухоподогревателя.

Температура газов на выходе из воздухоподогревателя (температура уходящих газов) – 126 °С. Поскольку она выше точки росы более чем на 35–37 °С, то низкотемпературной коррозии газового тракта, расположенного за воздухоподогревателем (газоходы, золоуловители, дымососы, дымовые трубы) ожидать не следует. Не следует ожидать и коррозионноопасных выбросов золы и сажи с серной кислотой.

## 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

### 4.1 Капитальные вложения

Предварительные сводно-сметные расчеты (таблица Г.1) выполнены на основе полученных ответов заводов-изготовителей, укрупненных удельных показателей и объектов-аналогов.

Представленные расчеты являются предварительными и подлежат уточнению на последующих стадиях проектирования.

### 4.2 Расчет издержек на производство электроэнергии Бийской ТЭЦ-1 при сжигании проектного топлива

Годовой расход условного топлива на отпущенную электроэнергию

а) За отопительный период:

$$B_{\text{отоп}}^{\text{ЭЭ}} = N_y \cdot h_y \cdot (1 - \alpha_{\text{сн}}) \cdot b_{\text{ош}} \cdot 10^{-3}, \text{ т у.т./год}, \quad (5)$$

где  $h_y = 4500$  - число часов использования установленной мощности Бийской ТЭЦ зимой,

$N_y$  – установленная мощность станции,

$\alpha_{\text{сн}}$  – доля отпущенной электроэнергии на собственные нужды,

$b_{\text{ош}}$  – удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии.

$$B_{\text{отоп}}^{\text{ЭЭ}} = 535 \cdot 10^3 \cdot 4500 \cdot (1 - 0,07) \cdot 0,343 \cdot 10^{-3} = 768 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год.}$$

б) За летний период:

$$B_{\text{лето}}^{\text{ЭЭ}} = N_y \cdot h_y \cdot (1 - \alpha_{\text{сн}}) \cdot b_{\text{ош}} \cdot 10^{-3}, \text{ т у.т./год}, \quad (6)$$

$$B_{\text{лето}}^{\text{ЭЭ}} = 535 \cdot 10^3 \cdot 1000 \cdot (1 - 0,069) \cdot 0,420 \cdot 10^{-3} = 209 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год.}$$

1000 - число часов использования установленной мощности Бийской ТЭЦ летом.

в) Суммарный:

$$B_y^{\text{ЭЭ}} = B_{\text{отоп}}^{\text{ЭЭ}} + B_{\text{лето}}^{\text{ЭЭ}}, \text{ т у.т./год}, \quad (7)$$

$$B_y^{\text{ЭЭ}} = 768 \cdot 10^3 + 209 \cdot 10^3 = 977 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год.}$$

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

Годовой расход условного топлива на отпущенную тепловую энергию

$$B_y^{TЭ} = Q_y \cdot h_y \cdot b_{ок} \cdot 10^{-3}, \text{ т у.т./год}, \quad (8)$$

$$B_y^{TЭ} = 1113,5 \cdot 10^3 \cdot 2500 \cdot 0,158 \cdot 10^{-3} = 440 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год};$$

$Q_y = 1113,5$  Гкал/ч - установленная тепловая мощность Бийской ТЭЦ

Общий годовой расход условного топлива

$$B_y = B_y^{ЭЭ} + B_y^{TЭ} = 977 \cdot 10^3 + 440 \cdot 10^3 = 1417 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год}. \quad (9)$$

Годовой расход натурального топлива

а) на отпущенную электроэнергию:

$$B^{ЭЭ} = B_y^{ЭЭ} \frac{Q_{HP}^{УТ}}{Q_{HP}^{HT}}, \text{ тнт/год}, \quad (10)$$

$$B^{ЭЭ} = 977 \cdot 10^3 \frac{7000}{5118} = 1336 \cdot 10^3 \text{ тнт/год}.$$

б) на отпущенную тепловую энергию:

$$B^{TЭ} = B_y^{TЭ} \frac{Q_{HP}^{УТ}}{Q_{HP}^{HT}}, \text{ тнт/год}, \quad (11)$$

$$B^{TЭ} = 440 \cdot 10^3 \frac{7000}{5118} = 600 \cdot 10^3 \text{ тнт/год}.$$

в) общий:

$$B = B^{ЭЭ} + B^{TЭ} = 1336 \cdot 10^3 + 600 \cdot 10^3 = 1936 \cdot 10^3 \text{ тнт/год}. \quad (12)$$

Издержки на топливо на отпущенную электроэнергию

$$I_T^{ЭЭ} = B^{ЭЭ} \cdot C_T, \text{ руб/год}; \quad (13)$$

$$I_T^{ЭЭ} = 1336 \cdot 10^3 \cdot 1313 = 1754 \cdot 10^6 \text{ руб/год}.$$

Издержки на топливо на отпущенную тепловую энергию

$$I_T^{TЭ} = B^{TЭ} \cdot C_T, \text{ руб/год}$$

$$I_T^{TЭ} = 600 \cdot 10^3 \cdot 1313 = 788 \cdot 10^6 \text{ руб/год}. \quad (14)$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

### Отчисления на амортизацию

По данным ПЭО Бийской ТЭЦ-1 годовые издержки на амортизацию составляют:

$$I_{\text{АМ}} = 64 \cdot 10^6 \text{ руб/год.}$$

### Отчисления на заработную плату

$$I_{\text{ЗП}} = n \cdot \Phi_{\text{ЗП}}, \quad (16)$$

где  $n$  – численность персонала ТЭЦ, человек;

По данным ПЭО Бийской ТЭЦ-1 численность персонала ТЭЦ на данный момент составляет 986 человек (456 человек эксплуатационного персонала),  $\Phi_{\text{ЗП}} = 360000 \text{ руб./}(чел. \text{ год})$ .

$$I_{\text{ЗП}} = 456 \cdot 360000 = 164,2 \cdot 10^6 \text{ руб/год.}$$

### Отчисления на социальные нужды

$$I_{\text{НАЧ}} = 0,3 \cdot I_{\text{ЗП}}, \text{ руб/год,} \quad (17)$$

$$I_{\text{НАЧ}} = 0,3 \cdot 164,2 \cdot 10^6 = 49,3 \cdot 10^6 \text{ руб/год.}$$

### Издержки на ремонт

По данным ПЭО Бийской ТЭЦ-1 годовые издержки на ремонт составляют:

$$I_{\text{РЕМ}} = 33 \cdot 10^6 \text{ руб/год.}$$

### Прочие издержки

$$I_{\text{ПР}} = 0,05 \cdot (I_{\text{Т}} + I_{\text{АМ}} + I_{\text{ЗП}} + I_{\text{НАЧ}} + I_{\text{РЕМ}}) =$$

$$= 0,05 \cdot (1754 + 788 + 64 + 164,2 + 49,3 + 33) \cdot 10^6 = 142,6 \cdot 10^6 \text{ руб / год.} \quad (18)$$

Полная величина годовых эксплуатационных расходов найдем как:

$$I = I_{\text{Т}} + I_{\text{АМ}} + I_{\text{ЗП}} + I_{\text{НАЧ}} + I_{\text{РЕМ}} + I_{\text{ПР}} =$$

$$= (1754 + 788 + 64 + 164,2 + 49,3 + 33 + 142,6) \cdot 10^6 = 2995,1 \cdot 10^6 \text{ руб / год.} \quad (19)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ош}} = 535 \cdot 10^3 \cdot 5500 \cdot (1 - 0,07) = 2737 \cdot 10^6, \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$Q_{\text{ОТП}} = 1704 \cdot 10^3 \text{ Гкал}$  - общее количество отпущенной тепловой энергии.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		38

#### 4.3 Расчет себестоимости энергии Бийской ТЭЦ-1 при сжигании проектного топлива

Сокращенная калькуляция себестоимости энергии ТЭЦ до реконструкции представлена в таблице Г.2.

#### 4.4 Расчет издержек на производство электроэнергии Бийской ТЭЦ-1 при сжигании непроектного топлива

Далее произведем расчет себестоимости тепловой и электроэнергии после реконструкции ТЭЦ. При этом учитывается увеличение отчислений на амортизацию на 1,5 млн. руб/год.

Годовой расход условного топлива на отпущенную электроэнергию

а) За отопительный период:

$$B_{\text{отоп}}^{\text{ЭЭ}} = N_{\text{у}} \cdot h_{\text{у}} \cdot (1 - \alpha_{\text{сн}}) \cdot b_{\text{ош}} \cdot 10^{-3}, \text{ т у.т./год}, \quad (20)$$

$$B_{\text{отоп}}^{\text{ЭЭ}} = 535 \cdot 10^3 \cdot 4500 \cdot (1 - 0,07) \cdot 0,341 \cdot 10^{-3} = 763 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год}.$$

б) За летний период:

$$B_{\text{лето}}^{\text{ЭЭ}} = N_{\text{у}} \cdot h_{\text{у}} \cdot (1 - \alpha_{\text{сн}}) \cdot b_{\text{ош}} \cdot 10^{-3}, \text{ т у.т./год}, \quad (21)$$

$$B_{\text{лето}}^{\text{ЭЭ}} = 535 \cdot 10^3 \cdot 1000 \cdot (1 - 0,069) \cdot 0,417 \cdot 10^{-3} = 208 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год}.$$

в) Суммарный:

$$B_{\text{у}}^{\text{ЭЭ}} = B_{\text{отоп}}^{\text{ЭЭ}} + B_{\text{лето}}^{\text{ЭЭ}}, \text{ т у.т./год}, \quad (22)$$

$$B_{\text{у}}^{\text{ЭЭ}} = 763 \cdot 10^3 + 208 \cdot 10^3 = 971 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год}.$$

Годовой расход условного топлива на отпущенную тепловую энергию

$$B_{\text{у}}^{\text{ТЭ}} = Q_{\text{у}} \cdot h_{\text{у}} \cdot b_{\text{ок}} \cdot 10^{-3}, \text{ т у.т./год}, \quad (23)$$

$$B_{\text{у}}^{\text{ТЭ}} = 1113,5 \cdot 10^3 \cdot 2500 \cdot 0,158 \cdot 10^{-3} = 440 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год}.$$

Общий годовой расход условного топлива

$$B_{\text{у}} = B_{\text{у}}^{\text{ЭЭ}} + B_{\text{у}}^{\text{ТЭ}} = 971 \cdot 10^3 + 440 \cdot 10^3 = 1411 \cdot 10^3 \text{ т у.т./год}. \quad (24)$$

Годовой расход натурального топлива

а) на отпущенную электроэнергию:

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

$$B^{\text{ЭЭ}} = B_y^{\text{ЭЭ}} \frac{Q_{\text{HP}}^{\text{УТ}}}{Q_{\text{HP}}}, \text{ тнт/год}, \quad (25)$$

$$B^{\text{ЭЭ}} = 971 \cdot 10^3 \frac{7000}{5230} = 1300 \cdot 10^3 \text{ тнт/год}.$$

б) на отпущенную тепловую энергию:

$$B^{\text{ТЭ}} = B_y^{\text{ТЭ}} \frac{Q_{\text{HP}}^{\text{УТ}}}{Q_{\text{HP}}}, \text{ тнт/год}, \quad (26)$$

$$B^{\text{ТЭ}} = 440 \cdot 10^3 \frac{7000}{5230} = 589 \cdot 10^3 \text{ тнт/год}.$$

в) общий:

$$B = B^{\text{ЭЭ}} + B^{\text{ТЭ}} = 1300 \cdot 10^3 + 589 \cdot 10^3 = 1889 \cdot 10^3 \text{ тнт/год}. \quad (27)$$

Издержки на топливо на отпущенную электроэнергию

$$I_T^{\text{Э.Э.}} = B^{\text{Э.Э.}} \cdot C_T, \text{ руб/год}; \quad (28)$$

$$I_T^{\text{Э.Э.}} = 1300 \cdot 10^3 \cdot 1118 = 1453 \cdot 10^6 \text{ руб/год}.$$

Издержки на топливо на отпущенную тепловую энергию

$$I_T^{\text{Т.Э.}} = B^{\text{Т.Э.}} \cdot C_T, \text{ руб/год} \quad (29)$$

$$I_T^{\text{Т.Э.}} = 589 \cdot 10^3 \cdot 1118 = 656 \cdot 10^6 \text{ руб/год}.$$

Отчисления на амортизацию

По данным ПЭО Бийской ТЭЦ-1 годовые издержки на амортизацию составляют:

$$I_{\text{AM}} = 64 \cdot 10^6 + 1,5 \cdot 10^6 = 65,5 \cdot 10^6 \text{ руб/год}.$$

Отчисления на заработную плату

$$I_{\text{ЗП}} = n \cdot \Phi_{\text{ЗП}},$$

где n – численность персонала ТЭЦ, человек;

$$I_{\text{ЗП}} = 456 \cdot 360000 = 164,2 \cdot 10^6 \text{ руб/год}.$$

Отчисления на социальные нужды

$$I_{\text{НАЧ}} = 0,3 \cdot I_{\text{ЗП}}, \text{ руб/год}, \quad (30)$$

$$I_{\text{НАЧ}} = 0,3 \cdot 164,2 \cdot 10^6 = 49,3 \cdot 10^6 \text{ руб/год}.$$

Издержки на ремонт

По данным ПЭО Бийской ТЭЦ-1 годовые издержки на ремонт составляют:

$$I_{\text{РЕМ}} = 33 \cdot 10^6 + 1 \cdot 10^6 = 34 \cdot 10^6 \text{ руб/год.}$$

Прочие издержки

$$I_{\text{ПР}} = 0,05 \cdot (I_{\text{Т}} + I_{\text{АМ}} + I_{\text{ЗП}} + I_{\text{НАЧ}} + I_{\text{РЕМ}}) = \\ = 0,05 \cdot (1453 + 656 + 65,5 + 164,2 + 49,3 + 34) \cdot 10^6 = 121,1 \cdot 10^6 \text{ руб / год.} \quad (31)$$

Полная величина годовых эксплуатационных расходов найдем как сумму всех затрат

$$I = I_{\text{Т}} + I_{\text{АМ}} + I_{\text{ЗП}} + I_{\text{НАЧ}} + I_{\text{РЕМ}} + I_{\text{ПР}} = \\ = (1453 + 656 + 65,5 + 164,2 + 49,3 + 34 + 121,1) \cdot 10^6 = 2543,1 \cdot 10^6 \text{ руб / год.} \quad (32)$$

$$\Theta_{\text{ош}} = 535 \cdot 10^3 \cdot 5500 \cdot (1 - 0,07) = 2737 \cdot 10^6, \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$Q_{\text{ОТП}} = 1704 \cdot 10^3 \text{ Гкал - общее количество отпущенной тепловой энергии.}$$

#### 4.5 Расчет себестоимости энергии Бийской ТЭЦ-1 при сжигании непроектного топлива

Сокращенная калькуляция себестоимости энергии ТЭЦ после реконструкции представлена в таблице Г.3.

#### 4.6 Расчет срока окупаемости

$$T_{\text{окуп}} = \frac{K_{\text{рек}}}{(S^{\Theta, \Theta.1} - S^{\Theta, \Theta.}) \cdot \Theta_{\text{ош}} + (S^{\text{Т.}\Theta.1} - S^{\text{Т.}\Theta.}) \cdot Q_{\text{ОТП}}} \quad (33)$$

где  $K_{\text{рек}}$  - капиталовложения в проект, руб;

символ 1 – до реконструкции.

$$T_{\text{окуп}} = \frac{127 \cdot 10^6}{(0,728 - 0,615) \cdot 2737 \cdot 10^6 + (588,3 - 505,3) \cdot 1704 \cdot 10^3} = 0,28 \text{ лет.}$$

Показатели работы ТЭЦ при сжигании проектного и непроектного топлива представлены в таблице Г.4.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		41

## 5 КОМПОНОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УСТАНОВКИ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В этом разделе рассматриваются вопросы, связанные с установкой необходимого дополнительного оборудования при переводе работы котлов БКЗ-210-140 Бийской ТЭЦ на уголь марки Д.

Для установки дымососов инертных газов с габаритами 3650x2000x2720 мм необходимо проложить газоход от ВЗП 2 ступени к входной горловине ШБМ. Участок газопровода с наружным диаметром 630 мм и с температурой уходящий газов 331°C. Его общая длина составляет 11,5 м.

Для компактности установки расположим трубопроводы и газоходы возле уже имеющихся труб.

Из монтажного чертежа видно, что новое оборудование не потребовало значительных реконструкций плана котельного отделения Бийской ТЭЦ.

На площадке, отведенной для нового оборудования, достаточно места для монтажных работ для его установки. Все имеющиеся на станции газо- и трубопроводы не препятствуют установке нового оборудования. Следовательно, дополнительные капитальные затраты на реконструкцию не требуются.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

## 6 ПЛАН МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПЕРЕВОДУ КОТЛА БКЗ-210-140 НА СЖИГАНИЕ НЕПРОЕКТНОГО УГЛЯ МАРКИ «Д»

- Установить дополнительную систему газового анализа ( $O_2$ ) на всас мельничных вентиляторов для обеспечения взрывобезопасности тракта пылеприготовления котла.
- Дооснастить сигнализацией котельную установку:
  - 1) максимального и минимального уровня пыли в бункере;
  - 2) возгорания пыли в бункере;
  - 3) предельного нижнего уровня в БСУ;
  - 4) предельно допустимого содержания кислорода в тракте пылеприготовления.
- Установить дополнительные защиты и блокировки на котел БКЗ-210-140:
  - 1) защиту, действующую на останов пылесистемы при раскрытии мембраны взрывного предохранительного клапана сепаратора и циклона (защита по повышению давления в системе пылеприготовления);
  - 2) блокировку, отключающую питатель сырого топлива (ПСУ), при снижении уровня топлива в бункере (БСУ) ниже 2 м;
  - 3) блокировку, отключающую питатель сырого топлива при отключении мельницы (ШБМ);
  - 4) блокировку, отключающую мельницы, питатели сырого топлива и пыли при отключении МВ.
- Выполнить реконструкцию системы пожаротушения котла.
- Выполнить установку приборов контроля разрежения в верхней части бункера пыли.
- Оснастить дополнительными пожарными рукавами со стволами все отметки тракта пылеприготовления, вывести пожарные рукава на крышу пылевых циклонов.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

- Установить систему подачи пара и мелко распыленной воды в газопровод перед мельницей, для экстренного понижения температуры пылегазовоздушной смеси за мельницей (в аварийных ситуациях).
- Оснастить БСУ котла датчиками температуры с выводом показаний на АРМ машиниста котла.
- Выполнить монтаж линии подачи инертных газов от ВЭК 2 ступени в ШБМ котла с установкой ДИГов.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

## 7.1 Описание объекта управления

Надежность работы котельного агрегата во многом определяется качеством регулирования уровня. Снижение уровня ниже допустимых пределов (упуск) может привести к нарушению циркуляции в экранных трубах, в результате чего произойдет повышение температуры стенок обогреваемых труб и их пережог. Повышение уровня воды в барабане (перепитка) недопустимо, так как может привести к аварийным последствиям: нарушение работы сепарационных внутрибарабанных устройств, попадание частичек воды в пароперегреватель и турбину, что приведет к тяжелым механическим ударам.

Из этого следует, что даже кратковременный упуск или перепитка недопустимы. В связи с этим к точности поддержания уровня предъявляются очень высокие требования.

Допустимое отклонение уровня воды в барабане от среднего значения зависят от конструкции котельных агрегатов и лежат в пределах (+100 ... - 200) мм.

Качество регулирования питания определяется не только точностью поддержания уровня на заданном значении, но и равномерностью подачи питательной воды. Необходимо обеспечить равномерное питание котла водой, так как частые и глубокие изменения расхода питательной воды могут вызвать значительные температурные напряжения в металле экономайзера, а также преждевременный выход из строя регулирующего органа.

Барабанным котлам с естественной циркуляцией присуща значительная аккумулялирующая способность, которая проявляется в переходных режимах. Если в стационарном режиме положение уровня воды в барабане котла определяется состоянием материального баланса, то в переходных режимах на положение уровня влияет большое количество возмущений. Основными из них являются:

- а) изменение расхода питательной воды;

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

- б) изменение отвода пара котла при изменениях нагрузки потребителя;
- в) изменение производительности котла при изменении тепловой нагрузки;
- г) изменение температуры питательной воды.

Так как удельный вес пара в барабанных котлах значительно отличается от удельного веса воды, то наблюдается отклонение уровня, несоответствующее знаку материального небаланса. Это явление носит название "набухания" уровня.

Рассмотрим основные типы возмущений и реакцию на них уровня в барабане котла.

### 7.2 Возмущение расходом питательной воды (ПВ)

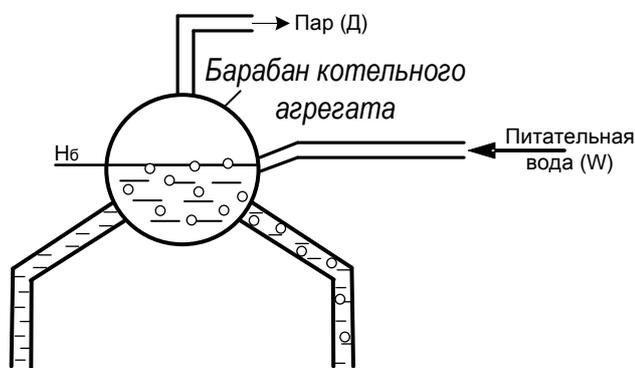


Рисунок 7.1 – Условная схема объекта регулирования

Возмущение расходом питательной воды может происходить как при регулирующем воздействии, так и при изменении давления питательной магистрали.

Форма временной характеристики по уровню при возмущении расходом питательной воды имеет вид, представленный на рисунке 7.2.

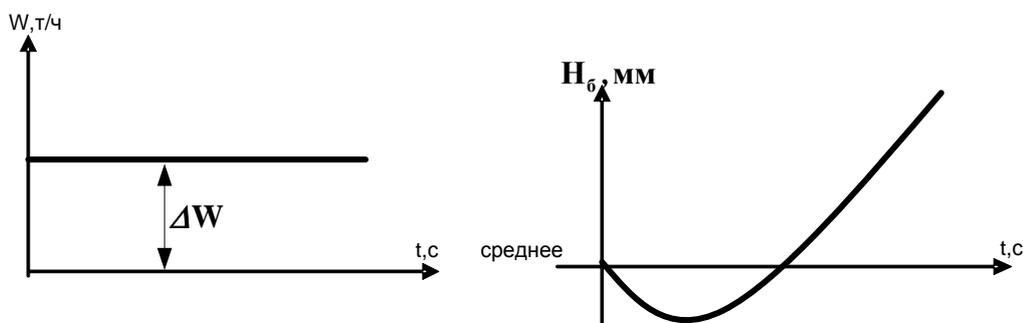


Рисунок 7.2 – Временная характеристика изменения уровня при возмущении расходом ПВ

Из временной характеристики, изображенной на рисунке 8.2, видно, что первоначальный момент времени уровень в барабане изменяется в сторону, несоответствующую знаку возмущающего воздействия, так как увеличение подачи холодной питательной воды вызывает понижение температуры всей пароводяной смеси и соответственное уменьшение пара в барабане котла.

### 7.3 Возмущение нагрузкой потребителя

При изменении (увеличении) нагрузки потребителя ( $D$ ) происходит падение давления в барабане котла, а это приводит к увеличению объема пузырьков пара и повышению уровня. Уменьшение давления в барабане котла приводит к уменьшению температуры кипения, вследствие чего происходит дополнительное парообразование за счет аккумулированного в котловой воде тепла.

Таким образом, изменение паровой нагрузки при неизменном расходе питательной воды и топлива в начальный момент времени вызывает набухание уровня. Через некоторое время уровень начинает изменяться в сторону, определяемую знаком материального небаланса.

Временная характеристика изменения уровня в барабане при ступенчатом постоянном изменении нагрузки приведена на рисунке 7.3.

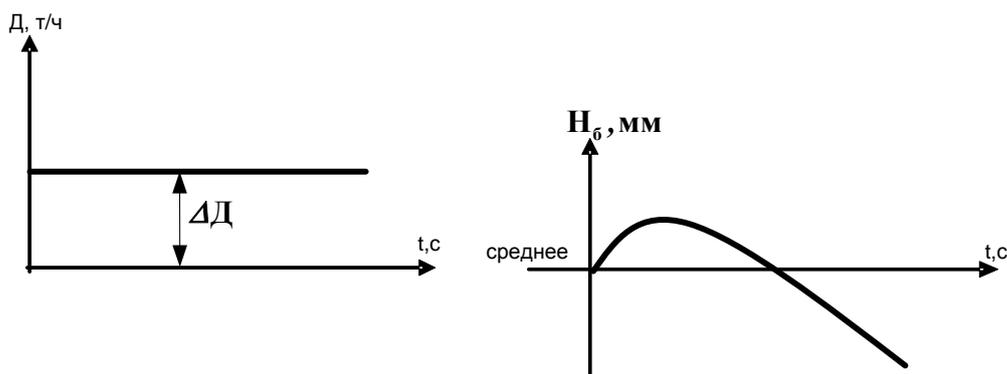


Рисунок 7.3 - Временная характеристика изменения уровня в барабане при возмущении расходом пара

### 7.4 Возмущение расходом топлива

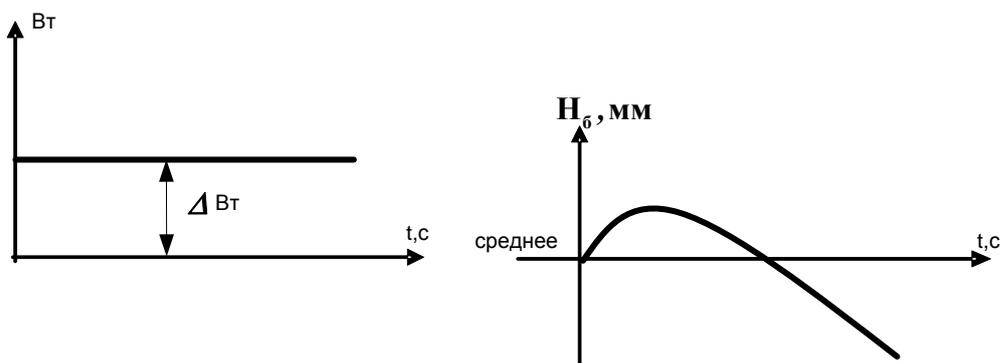


Рисунок 7.4 - Временная характеристика изменения уровня в барабане при возмущении расходом топлива

При увеличении расхода топлива (рисунок 7.4) увеличивается тепловосприятие поверхности нагрева котла и происходит увеличение парообразования, что приводит к увеличению объема пузырьков пара, а, следовательно, увеличивается уровень воды в барабане. Одновременно это приводит к повышению давления в барабане. Вследствие чего растет температура кипения котловой воды. Это, в свою очередь, ведет к дополнительной аккумуляции тепла котловой водой и, как следствие, к уменьшению объема пузырьков пара, что вызывает снижение уровня.

Таким образом, при возмущении расходом топлива в испарительном контуре протекают одновременно два противоположных процесса, и набухание уровня проявляется в несколько меньшей степени, чем в случае возмущения нагрузкой потребителя.

### 7.5 Возмущение температурой питательной воды

Возмущение температурой питательной воды может произойти при изменении количества работающих регенеративных подогревателей высокого давления.

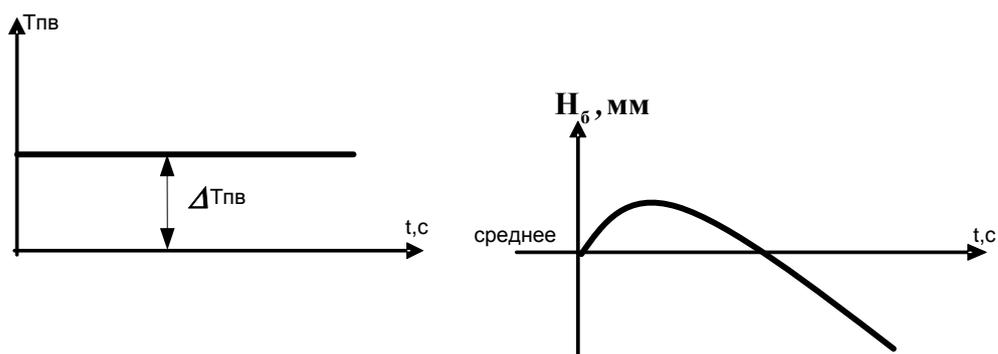


Рисунок 7.5 - Временная характеристика изменения уровня в барабане при возмущении изменением температуры ПВ

При увеличении температуры питательной воды и постоянном обогреве увеличивается парообразование в испарительном контуре. В результате этого уровень воды в барабане будет повышаться. В дальнейшем увеличение парообразования при постоянном расходе пара к потребителю приведет к подъему давления в барабане котла и, как следствие этого, к уменьшению удельного объема пара и сокращению парообразования, что вызовет снижение уровня воды в барабане.

Таким образом, реакция объекта регулирования на изменение температуры питательной воды аналогична его поведению при изменении расхода топлива.

Котел, как объект регулирования питания, обладает рядом свойств, затрудняющих поддержание заданного уровня в переходных режимах: запаздыванием, явлением набухания и отсутствием самовыравнивания.

## 7.6 Выбор структурной схемы системы управления

Выбор структурной схемы является одним из важных этапов разработки подсистемы автоматизированного управления технологическим процессом.

Применение одноимпульсной АСР уровня воды в барабане парового котла (рисунок 7.6) не обеспечивает требуемого качества регулирования, так как характерным возмущением на систему является изменение расхода пара для потребителя.

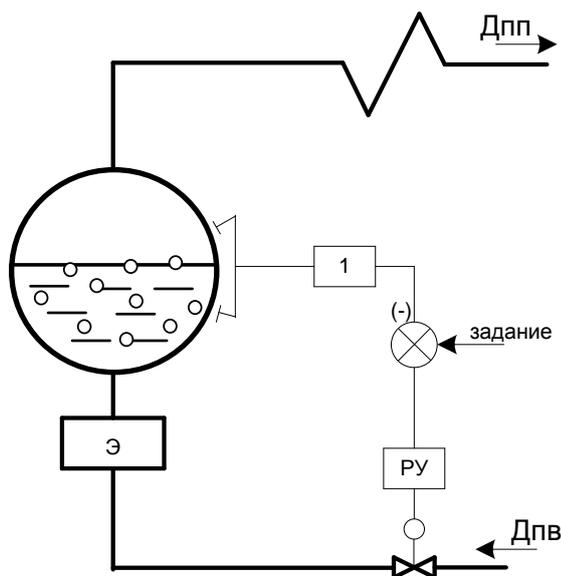


Рисунок 7.6 – Одноимпульсная система регулирования уровня в барабане котла: Дпп – расход перегретого пара; Дпв – расход питательной воды; 1 – датчик уровня; Э – экономайзер; РУ – регулирующее устройство

При этом проявляется так называемое явление набухания. В первый момент при увеличении расхода пара на потребление уровень воды даже возрастает. И регулятор РУ, вместо того чтобы прибавлять питательную воду, начинает ее убавлять. Только после уменьшения уровня начинается добавление воды; уровень воды в барабане сильно падает. При определенных достаточно глубоких возмущениях по нагрузке появляется опасность аварийных ситуаций.

Можно сделать вывод, что данная система регулирования уровня в барабане котла не удовлетворяет предъявленным выше требованиям.

Рассмотрим двухимпульсную систему регулирования уровня в барабане котла, для этого введем дополнительный импульс по расходу пара (рисунок 7.7). Такое дополнение позволяет повысить качество регулирования и не допустить значительного отклонения уровня воды при возмущении по этому каналу.

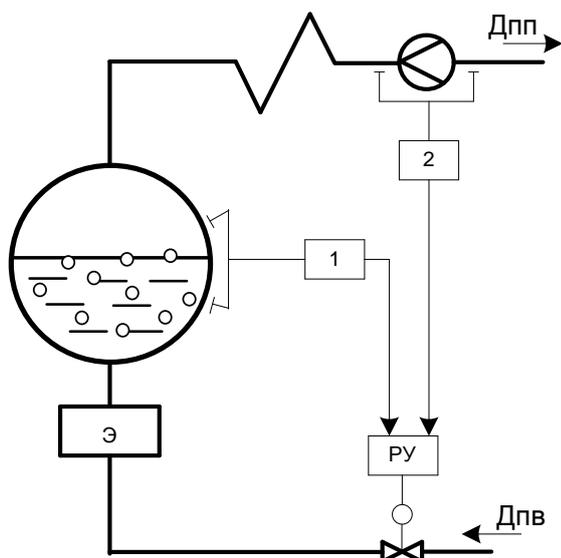


Рисунок 7.7 – Двухимпульсная система регулирования уровня в барабане котла: Дпп – расход перегретого пара; Дпв – расход питательной воды; 1 – датчик уровня; 2 – датчик расхода; Э – экономайзер; РУ – регулирующее устройство

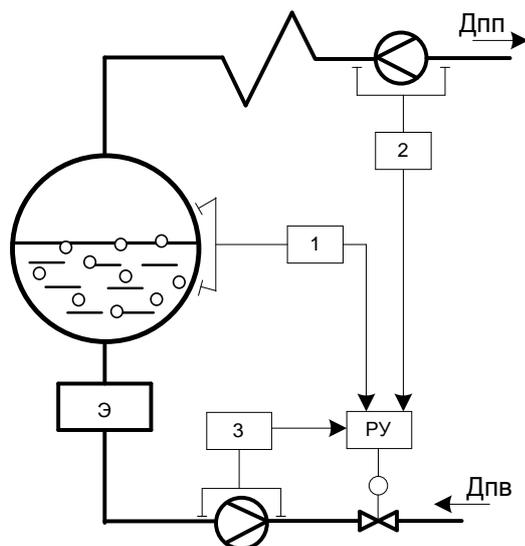


Рисунок 7.8 – Трехимпульсная система регулирования уровня в барабане котла: Дпп – расход перегретого пара; Дпв – расход питательной воды; 1 – датчик уровня; 2, 3 – датчики расхода; Э – экономайзер; РУ – регулирующее устройство

Трехимпульсная система (рисунок 7.8) является типовой, общепринятой системой регулирования уровня воды в барабане котла. В этом случае в динамике

при возмущении по расходу пара АСР работает, как описано выше, а статическая ошибка устраняется за счет того, что сигналы по расходу пара и воды подаются в установившемся состоянии (в статике) на вход регулятора равными по значению и противоположными по знаку.

Очевидно, что трехимпульсная система регулирования уровня воды в барабане (рисунок 7.8) обеспечивает наилучшее поддержание заданного уровня воды в барабане при различных возмущениях.

Для получения импульса по расходу перегретого пара необходимо на трубопровод ведущий в цилиндры высокого давления (до главной паровой задвижки по ходу движения пара), установить первичный преобразователь (FE) - сужающее устройство. Сигнал об измеряемом параметре вырабатывается преобразователем разности давления (FT) и подается на регулирующее устройство (LC) для дальнейшей обработки.

Для получения импульса по расходу питательной воды необходимо на трубопровод питательной воды парогенератора (до экономайзера) установить первичный преобразователь (FE)-сужающее устройство. Сигнал об измеряемом параметре вырабатывается преобразователем разности давления (FT) и подается на регулирующее устройство (LC) для дальнейшей обработки.

Для получения третьего импульса – импульса по уровню воды в барабане парогенератора следует использовать гидростатический метод измерения уровня (на импульсных трубках уравнительного сосуда и преобразователя разности давления (LT)). Электрический сигнал от преобразователя разности давлений подается на регулирующее устройство (LC) для дальнейшей обработки.

Для обеспечения возможности задания значения уровня воды в барабане необходимо предусмотреть задатчик (HL), сигнал от которого подается на регулирующее устройство (LC).

Для возможности перевода АСР в ручной режим необходимо использовать переключатель на ручной режим (HSA), сигнал на который подается от регулирующего устройства.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

Для управления электроприводом, установленном на регулирующем питательном клапане, сигнал от регулирующего устройства необходимо усилить, для чего используется усилитель мощности сигнала (NS).

Сигнал от усилителя мощности попадает на электропривод, который приводит в движение регулирующий питательный клапан, установленный на трубопроводе питательной воды парогенератора.

Функциональная схема АСР уровня воды в барабане котла представлена на ФЮРА 421000.008 С2.

В приложении Д представлена заказная спецификация на средства автоматического контроля и регулирования уровня воды в барабане котла.

Исходным документом для составления спецификации является функциональная схема автоматизации.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

## 8 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В данном разделе дипломного проекта рассмотрен котельный цех Бийской ТЭЦ при монтаже нового оборудования. Данный цех относится к категории Г пожарной опасности. По электрической опасности цех относится к категории с повышенной опасностью. При проведении монтажа работы выполняются на высоте, выполняются сварочные работы.

Служба охраны труда на предприятии создается для организации и координации мероприятий по охране труда, контролю за соблюдением законодательных и нормативных правовых актов по охране труда работниками, совершенствованию профилактической работы по предупреждению производственного травматизма, профессиональных и производственно – обусловленных заболеваний и улучшению условий труда.

### 8. 1. Анализ опасных и вредных факторов по [17]

Работа на производстве может сопровождаться опасными (вызывающими травмы) и вредными (вызывающими профессиональные заболевания или снижение работоспособности) производственными факторами. Безопасностью труда принято называть такое состояние условий труда, при котором отсутствует возможность воздействия на человека опасных факторов. В теплоэнергетике опасными факторами являются пар и горячая вода, огневая техника и искры, повышенная температура воздуха и предметов, газ, движущиеся части оборудования, электрический ток, физические и нервно-психические перегрузки, вибрация, шум и др.

Работы по монтажу технологических установок являются особо ответственными. Они связаны с опасными факторами ожога людей, поражением электрическим током, загоранием горючих веществ. Поэтому они требуют большого внимания и осторожности.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

Охрана труда на ТЭЦ, в основном, направлена на предотвращение производственного травматизма и создание оптимальных условий труда. Все работы должны производиться в строгом соответствии с правилами безопасности.

## 8. 2. Разработка решений по технике безопасности по [18]

На электрическом предприятии имеется специальная служба техники безопасности, которая несет ответственность за организацию работы на предприятии по созданию здоровых и безопасных условий труда работающих, предупреждению несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний.

Служба техники безопасности отвечает за охрану труда при проектировании теплоэнергетических объектов. Проекты организации строительства и производства работ должны содержать технические решения по созданию условий безопасного и безвредного производства работ на строительной площадке, объектах монтажа и рабочих местах в обычных и зимних условиях, по санитарно - гигиеническому обслуживанию рабочих; по достаточному освещению строительной площадки, проходов, проездов и рабочих мест.

## 8. 3. Условия труда при работе в теплосиловых цехах электрических станций

Монтаж нового оборудования происходит в условиях повышенной температуры и влажности воздуха, взаимодействие с электрическим током.

Оптимальными условиями труда считаются такие, которые при систематическом и длительном воздействии обеспечивают нормальное состояние организма человека и его высокую работоспособность.

### 8. 3. 1. Планировка рабочего места

Рабочим местом называется зона постоянного или временного пребывания человека при выполнении работы. В теплосиловых установках электростанции рабочим местом принято называть участок установки и относящуюся к нему территорию. Пространство высотой до 2 м над уровнем рабочей площадки называется рабочей зоной.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		55

Требования к рабочему месту установлены гостами. Основные требования следующие: на рабочем месте должны быть обеспечены наиболее благоприятные для человека условия работы, ощущения комфорта и полной безопасности; конструкция рабочего места, размеры рабочих зон должны соответствовать росту, размерам и форме тела, показателям зрения и слуха; планировка рабочего места должна избавлять рабочего от лишних и утомительных трудовых движений и обеспечивать удобную рабочую позу; рабочее место должно быть обеспечено материалами, инструментами и приспособлениями для выполнения работы.

В соответствии с санитарными нормами рабочее место должно быть освещено, провентилировано, постоянно содержаться в чистоте; недопустимы захламленность, беспорядок и грязь.

#### 8. 3. 2. Воздух рабочей зоны по [19]

К категории Пб относятся работы с интенсивностью энерготрат 201-250 ккал/час, связанные с ходьбой, перемещением и переноской тяжестей до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим напряжением.

Способность организма человека регулировать теплообмен тела с окружающей средой, поддерживая неизменной температуру, называется терморегуляцией.

Температура, относительная влажность, скорость движения воздуха возле тела человека, а также температура стен и окружающих предметов образуют микроклимат на рабочем месте.

Установлены нормы допустимого микроклимата в рабочей зоне в зависимости от сезона (табл. 10. 1.).

Нормы оптимального микроклимата в рабочей зоне:  
относительная влажность 60-40 %.

Допустимая область влажности воздуха 40-75 %. При влажности более 75 % затрудняется испарение пота, менее 40 % пересыхание слизистой оболочки.

Допустимая область подвижности воздуха 0,2-1 м/с. Застойный воздух затрудняет конвекцию, слишком подвижный вызывает сквозняк.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

Человеку необходим чистый воздух без примесей пыли, вредных аэрозолей, газов, паров. При наличии в воздухе частиц ядовитых веществ возможно отравление, вредной пыли - заболевание легких. Особенно вредна кварцевая пыль, способная отлагаться в легких и вызывать их заболевание.

Таблица 8.1 – Нормы допустимого микроклимата в рабочей зоне в зависимости от сезона года (СанПиН 2.2.4.548-96)

Сезон года, температура наружного воздуха	Категория работы	Температура в рабочей зоне, °С	Скорость Движения воздуха, м/с
Холодный и переходной, менее +10 °С	Средней тяжести Пб	15-22	0,3
Теплый, +10 °С и более	Средней тяжести Пб	16-27	0,4

### 8. 3. 3. Защита от избыточной теплоты

Нагретые поверхности котлов, паропроводов, турбин излучают тепловую энергию. Применяются следующие способы защиты от теплоты (избыточной): теплоизоляция горючих поверхностей; экранирование источников излучения поглощающими и отражающими теплоту материалами; воздушные души и вентиляция; защитная одежда; ограничение длительности работы при больших тепловых нагрузках с обязательными перерывами отдыха.

### 8. 3. 4. Защита от вредных веществ

Для уменьшения утечек вредных веществ в окружающую среду непосредственно из источника их возникновения необходимы надежная герметизация топков, газоходов, газопроводов, насосов, компрессоров; замена токсичных веществ нетоксичными.

### 8. 3. 5. Освещение рабочих мест и производственных помещений

Освещенность должна соответствовать Строительным Нормам и Правилам. Минимальное значение искусственной освещенности производственного помещения согласно СНиП 23-05-95 составляет 200-300 лк.

Из общего объема информации человек получает через зрительный канал около 80 %. Качество поступающей информации во многом зависит от освещения: неудовлетворительное количественное или качественное, оно не только утомляет зрение, но и вызывает утомление всего организма в целом. Нерациональное освещение может, кроме того, являться причиной травматизма: плохо освещенные опасные зоны, слепящие источники света и блики от них, резкие тени ухудшают видимость настолько, что вызывают полную потерю ориентации рабочих. Неправильная эксплуатация также как и ошибки, допущенные при проектировании и устройстве осветительных приборов в пожаро- и взрывоопасных цехах (неправильный выбор источника света, светильников, проводов и т.д.) могут привести к взрыву, пожару и несчастным случаям. При неудовлетворительном освещении, кроме того, снижается работоспособность и производительность труда.

#### 8. 3. 6. Вибрация и шум по [20]

Допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука классифицируются по ГОСТ 12.1.003-83. Гигиенические нормы уровней вибростороности классифицируются по ГОСТ 12.1.012-90.

Источником вибрации и шума являются вращающиеся механизмы и агрегаты большой мощности, ручной виброинструмент (например, турбина, электрогенератор, подшипниковые узлы, редуктор, ПНД, насосы и др.).

В ряде случаев практически невозможно уменьшить шум и вибрацию до допустимых уровней. Для предотвращения профессиональных заболеваний, работающих в шумных условиях или в условиях воздействия вибрации должны соблюдать правила безопасной работы. ГОСТами установлены следующие меры защиты: применение средств индивидуальной защиты, чередование труда и актив-

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

ного отдыха, сокращение длительности работы в вибро- и шумоопасных условиях.

#### 8. 3. 6. 1. Защита от шума по [20]

В таблице 8.2 представлены источники шума возникающие в котельном цехе и их уровень.

Таблица 8.2 –Источники шума и их уровень

Оборудование	Уровень шума, дБ·А
ТВД	79 – 117
ШБМ	100 – 103
ДС	94 – 103
насосы	85 – 99
паропроводы	87 – 98

Зоны с уровнем звука выше 85 дБ\*А обозначены знаками безопасности. Работаящие в этих зонах снабжены средствами индивидуальной защиты. Запрещается даже кратковременное пребывание в зонах с уровнями звукового давления выше 135 дБ.

#### 8. 3. 6. 2. Защита от вибрации

На рабочем участке уровень общей вибрации не превышает допустимый. На ограниченных участках зон расположения ШБМ (отметки +0 м), имеет место превышение допустимых значений. Снизить вибрацию можно увеличением массы фундамента рабочей площадки или облицовкой пола вибродемпфирующими материалами, специальными ковриками. Эффективно защищает от вибрации виброгасящая обувь.

#### 8. 3. 7. Пожаробезопасность

Пожарная безопасность характеризуется СНиП 21-01-97 и ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ.

Данный цех относится к категории Г – производства, связанные с негорючими веществами и материалами в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла,

искр и пламени; горючими газами, жидкостями и твердыми веществами, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.

Система пожарной защиты предусматривает, наряду с мерами предотвращения возникновения пожара и распространение его за пределы очага возгорания, также применение средств пожаротушения и пожарной сигнализации.

Для тушения пожаров применяют первичные средства тушения, к которым относятся водяные и воздушно-пенные пожарные стволы, присоединенные при помощи рукавов к системе пожарного водопровода при помощи пожарных кранов, располагаемых в наиболее доступных и безопасных местах здания.

В целях повышения пожарной безопасности на тепловых электростанциях запрещены кабели с полиэтиленовой изоляцией и оболочкой, необходимо применять только кабели с негорючими покрытиями. Трассы кабеля должны проходить на безопасных расстояниях от нагретых поверхностей, следует предусматривать их защиту от внешних воздействий и перегрева.

#### 8. 3. 8. Выходы для эвакуации во время пожара

В каждом цехе на случай возникновения пожара обеспечивают возможность быстрой и безопасной эвакуации людей через эвакуационные выходы - двери, ворота, проходы. Выходы считаются эвакуационными, если они ведут из помещений:

- а) первого этажа непосредственно наружу;
- б) в соседние помещения того же этажа, имеющие выход наружу непосредственно или через лестничные клетки;
- в) в проход или из коридора непосредственный выходом наружу или через местную клетку.

Расстояние между выходами из цехов электростанций составляют не более 30 м в противоположных сторонах помещения. Число выходов и лестниц не менее двух.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		60

Расстояние от наиболее удаленного рабочего места до выхода не более 30 м. Двери в помещениях открываются только наружу или по направлению выходов наружу (ближайших).

### 8. 3. 9. Меры безопасности при монтаже нового оборудования

Исходя из вышесказанного следует, что при монтаже на ТЭЦ нового оборудования, греющей средой у которых является пар из отборов турбины, необходимо, в плане техники безопасности, решать следующие вопросы: меры безопасности при обслуживании производственных трубопроводов, теплообменных аппаратов и насосного оборудования. В зависимости от вида и параметров протекающей среды трубопроводы, в соответствии с «Правилами устройства и безопасности эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды», разделяют на 4 категории.

При работе на высоте: Запрещается сбрасывать с высоты демонтируемые части оборудования (трубы, части обшивки, изоляцию и т.п.) и мусор. Удалять демонтируемые части оборудования и мусор следует механизированным способом в закрытых ящиках и контейнерах или по закрытым желобам.

При выполнении электросварочных, газопламенных и других огневых работ должны соблюдаться требования «ГОСТ 12.3.003-86 ССВТ. Работы электросварочные». Требования безопасности, приемки работ. Техника безопасности в строительстве, Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей, Правил техники безопасности и производственной санитарии при электросварочных работах, Правил безопасности при работе с инструментом и приспособлениями и Инструкции о мерах пожарной безопасности при проведении огневых работ на энергетических объектах.

В зависимости от категории трубопроводам предъявляются различные требования к схеме, конструкции, выбору материалов труб, арматуре, деталям, обеспечивающих безопасность при заданных параметрах. Все горячие части оборудования, трубопроводы, баки и другие элементы, прикосновение к которым может вызвать ожоги, должны иметь тепловую изоляцию. Температура на поверхности

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		61

изоляции при температуре окружающего воздуха 25 °С должна быть не выше 45 °С.

При монтаже нового оборудования и вводе его в эксплуатацию необходимо руководствоваться общими правилами эксплуатации теплообменных аппаратов.

#### 8. 4. Электробезопасность

ГОСТ 12.1.019-79 – общие требования и номенклатура видов защиты от поражения электрическим током. ГОСТ 12.1.038-82 – предельно-допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

По электрической опасности цех относится к категории с повышенной опасностью, т.к. помещение характеризуется наличием токопроводящих полов (металлические) и возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединению с землей металлоконструкциями зданий и к металлическим корпусам электрооборудования. В помещении котельного цеха используется переменный ток с напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Ток этих параметров используется для освещения.

Чаще всего электротравмы происходят на установках переменного тока с напряжением 220-380 В. Наиболее опасными местами являются распределительные устройства, аппараты защиты, коммутационные аппараты. Наиболее опасными элементами электрических установок являются пускатели, рубильники, автоматы и предохранители.

Безопасность персонала при обслуживании электроустановок обеспечивается путём:

1. Применения надлежащей изоляции;
2. Применения ограждения токоведущих частей;
3. Заземления и зануления корпусов и элементов электроустановок, находящихся под напряжением;

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		62

4. Применения светильников взрывобезопасного исполнения, в необходимых местах;

5. Применение ручных переносных светильников напряжением 42 В и ниже;

6. Использование индивидуальных средств защиты.

#### 8. 5. Охрана окружающей среды

На территории котельного цеха возможны следующие отходы и методы утилизации их:

- Стоки, образующиеся в результате проведения промывочных работ по уборке цеха или наружной очистки оборудования могут содержать масла. Эти отходы хранятся в герметичных емкостях, исключающих смешивание отходов с атмосферными осадками.

- Твердые сыпучие отходы (ТБО, смет с территории цеха) хранятся в специальных бункерах или контейнерах, исключающих загрязнения цеха.

- Большим по объему отходом в котельном цехе является лом черного металла, образующийся в основном в результате плановых работ по текущему и капитальному ремонту технологического оборудования. Металлолом собирается на специально оборудованной площадке и затем утилизируется (переплавляется, либо используется в качестве запасных частей).

- Отработанные смазывающие материалы сливаются в специальные емкости, предотвращающие попадание масла в окружающую среду. Емкость установлена на складе с обустроенной асфальтобетонной площадкой.

- Ветошь обтирочная собирается на рабочих местах в специально предназначенные для этого контейнеры, объемом 0,02 м<sup>3</sup> каждый. Все контейнеры расположены в помещениях, что исключает возможность загрязнения промплощадки нефтепродуктами, содержащимися в ветоши. По мере накопления ветошь переносится в котельную и уничтожается методом сжигания.

## 8.6. Расчет искусственного заземления по [21]

Искусственное заземляющее устройство состоит из вертикальных электродов и горизонтально расположенной соединительной полосы.

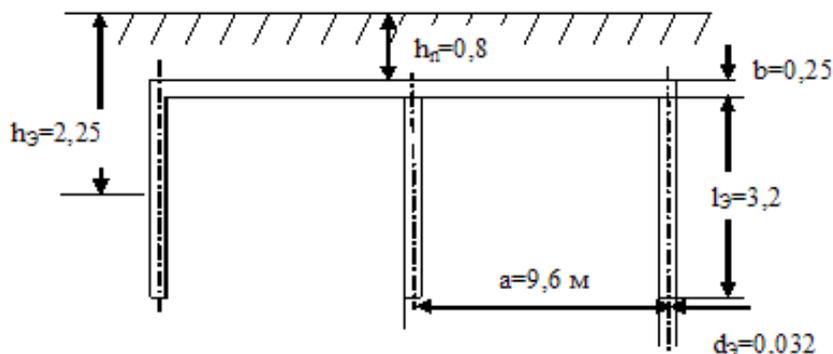


Рисунок 8. 1. – Расположение заземлителей в грунте [6]

Исходные данные:

$l_э=320$  см – длина электрода;

$d_э=3,2$  см – диаметр электрода;

$h_э=225$  см – глубина заложения электрода;

$a=960$  см – расстояние между электродами;

$b=25$  см – ширина соединительной полосы;

$h_n=80$  см – глубина заложения соединительной полосы;

$n$  – количество электродов.

1. Определяем сопротивление одного электрода:

$$r_э = \frac{\rho_э}{2 \cdot \pi \cdot l_э} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l_э}{d_э} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot h_э + l_э}{4 \cdot h_э - l_э} \right) \right]; \quad (34)$$

где  $\rho_э = \rho_э \cdot \psi_э = 100 \cdot 1,5 = 150$  Ом·м;

$$r_э = \frac{150}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,2} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot 3,2}{0,032} \right) + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot 2,25 + 3,2}{4 \cdot 2,25 - 3,2} \right) \right] = 42 \text{ Ом.}$$

2. Количество электродов:

$$n = \frac{R_э}{R_{\text{треб}}} = \frac{42}{4} = 10,5 \approx 11 \text{ шт.} \quad (35)$$

3. Определяем коэффициент использования электродов:

$$\eta_3 = 0,83.$$

4. Определяем длину соединительной полосы:

$$L_n = a \cdot (n-1); \quad (36)$$

$$L_n = 9,6 \cdot (11-1) = 96 \text{ м.}$$

5. Определяем сопротивление соединительной полосы:

$$r_n = \frac{\rho_n}{2 \cdot \pi \cdot L_n} \cdot \ln \frac{2 \cdot L_n^2}{h_n \cdot b}, \quad (37)$$

где  $\rho_n = \rho_r \cdot \psi_n = 100 \cdot 3 = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное расчетное сопротивление грунта для полосы;

$$r_n = \frac{300}{2 \cdot 3,14 \cdot 96} \cdot \ln \frac{2 \cdot 96^2}{0,8 \cdot 0,25} = 5,7 \text{ Ом.}$$

6. Определяем общее сопротивление контура:

$$r_\Sigma = \frac{r_3 \cdot r_n}{r_3 \cdot \eta_n + r_n \cdot \eta_3 \cdot n}; \quad (38)$$

где  $\eta_n = 0,82$ ,  $\eta_3 = 0,81$  – коэффициент использования соединительной полосы и электродов;

$$r_\Sigma = \frac{42 \cdot 5,7}{42 \cdot 0,82 + 5,7 \cdot 0,81 \cdot 11} = 2,81 \text{ Ом.}$$

7. Производим проверку выполнения условия  $r_\Sigma < r_3$ , где  $r_3$  – сопротивление заземляющего устройства, равное 4 Ом. Условие выполняется ( $2,81 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$ ), следовательно, расчеты выполнены верно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выпускной работы был разработан проект перевода котлов БКЗ-210-140 на сжигание угля марки «Д».

В ходе выполнения работы решен ряд поставленных задач:

- работу рассчитанного котла можно переводить на заданное топливо;
- экономичность работы котла на заданном непроектном топливе будет достаточно высокой;
- надежность работы топки, пароперегревателя и экономайзера будет вполне удовлетворительной;
- определены компоновочные решения по установке нового оборудования; выполнено технико-экономическое обоснование перевода котлов на непроектное топливо.

Предлагаемый в выпускной работе проект требует затрат на реконструкцию, но проведенные технико-экономические расчеты показали, что проект является экономически эффективным. Это можно увидеть по следующим показателям:

1. Уменьшение удельного расхода условного топлива на 2 г/кВтч;
2. Срок окупаемости капитальных вложений  $T_{ок} = 0,28$  лет.

Предложенный проект после дополнительной проработки в специализированных организациях может быть внедрен не только на Бийской ТЭЦ, но и на других станциях подобного типа.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Материалы преддипломной практики.
- 2 Галащов Н.Н. Тепломеханическое и вспомогательное оборудование электростанций. –Томск: Изд-во ТПУ. 2010. –244 с.
- 3 Вукалович М.П., Ривкин С.Л. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Энергоиздат, 1969. – 180 с.
- 4 Расчет показателей работы электростанций. Методические указания для студентов направления 550900 "Теплоэнергетика", специальностей 100500 «Тепловые электрические станции» и 101000 «Атомные электрические станции и установки». - Томск: Изд. ТПУ, 2001.- 44 с.
- 5 Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции: учебник для вузов / под ред. В.Я. Гиршфельда. – М.: Энергия, 1986. – 245с.
- 6 Программа для ЭВМ «WaterSteamPro» – Расчет параметров воды и водяного пара.
- 7 Программа для ЭВМ «WaterSteamPro» – Расчет параметров воздуха и газов.
- 8 Петровский Ю. В., Фастовский В. Г. Современные эффективные теплообменники. ГЭИ.-М.,-Л: 1962.-265 с.
- 9 Программа для расчета тепловых схем Scheme v. 3/ 1/ 1 from Group ENEK. Электронный справочник ENEKcalc v 3. 0. 7.
- 10 Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. – 8-е изд., стереот. /Е. Я. Соколов. – М.: Издательский домМЭИ, 2006. – 472 с.: ил.
- 11 Качан А.Д., Режимы работы и эксплуатации тепловых электрических станции. – Минск..Высшая школа, 1978 –287 с
- 12 Печеник Б.Я., Искольский С.Д., Модернизация и реконструкция паровых турбин Л.,Энергия, 1968 –223 с
- 13 Емельянов А.И., Капник О. В. Проектирование систем автоматизации

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

- технологических процессов. Справочное пособие по содержанию и оформлению проектов. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 400 с.
- 14 Рихтер Л.А., Елизаров Д.П., Лавыгин В.М. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 216 с.
- 15 Кац М.Д. Автоматизация технологических процессов. Методические указания по выполнению раздела дипломного проекта для студентов теплоэнергетического факультета.- Томск: Изд. ТПУ, 2001.–14 с.
- 16 ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – 46 с.
- 17 Охрана труда: Учебник для студентов вузов/ Князевский Б.А., Долин П.А., Марусова Т. П. и др.; Под ред. Б.А. Князевского. – М.: Высшая школа, 1982. – 311 с.
- 18 СанПин 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – 56 с.
- 19 ГОСТ 12.1.003-83.ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – 58с.
- 20 Методические указания к расчёту защитного заземления. Под ред. Б.А. Тихонова. – 65с.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЛА

#### А.1 Краткое описание рассчитываемого котла

А.1.1. Котел энергетический высокого давления барабанного типа с естественной циркуляцией. Компоновка поверхностей нагрева котла традиционная – П-образная.

А.1.2. Топка камерная, пылеугольная, открытая с твердым шлакоудалением. Стены топки заэкранированы газоплотными цельносварными мембранными панелями из гладких труб с продольно вваренными проставками.

А.1.3. Пароперегреватель радиационно-конвективного типа. Радиационная часть пароперегревателя расположена на потолке топки, полурadiационные двухзаходные ширмы размещены в выходном газовом окне топки, конвективные ступени – в поворотном газоходе котла.

А.1.4. Низкотемпературные поверхности нагрева представлены стальным змеевиковым экономайзером и трубчатым воздухоподогревателем, скомпонованными по двухступенчатой схеме.

А.1.5. Пылеприготовительная установка с шаровыми барабанными мельницами (ШБМ) и промежуточным бункером. Сушка топлива – смесью горячего воздуха и инертных газов.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

## А.2 Основные характеристики котла

- Паропроизводительность котла  $D_{пе} = 210$  т/ч (58,33 кг/с).
- Давление перегретого пара  $p_{пе} = 14$  МПа.
- Температура перегретого пара  $t_{пе} = 545$  °С.
- Температура питательной воды  $t_{пв} = 230$  °С.
- Давление в барабане  $p_б = 15,4$  МПа.
- Непрерывная продувка  $p_{пр} = 5$  %.
- Система пылеприготовления – ШБМ с промежуточным бункером.
- Шлакоудаление – твердое.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

### А.3 Расчетные теплотехнические характеристики топлива

А.3.1 Заданное топливо – уголь Кузнецкого бассейна марки Д.

А.3.2 Нормативный элементарный состав заданного топлива в рабочем состоянии [3, табл. I]:

- содержание углерода  $C^r = 56,4\%$ ;
- содержание водорода  $H^r = 4,0\%$ ;
- содержание серы пиритной и органической  $S_{(p+o)}^r = 0,4\%$ ;
- содержание азота  $N^r = 1,9\%$ ;
- содержание кислорода  $O^r = 9,9\%$ ;
- влага рабочего топлива  $W_t^r = 11,5\%$ ;
- зола рабочего топлива  $A^r = 15,9\%$ .

Контрольная сумма для нормативного состава топлива

$$C^r + H^r + S_{(p+o)}^r + N^r + O^r + W_t^r + A^r = \\ = 56,4 + 4,0 + 0,4 + 1,9 + 9,9 + 11,5 + 15,9 = 100\%$$

что свидетельствует о правильности принятия нормативного состава топлива.

А.3.3 Низшая теплота сгорания топлива нормативная [3, табл. I]

$$Q_i^r = 21,9 \text{ МДж/кг} (21900 \text{ кДж/кг})$$

А.3.4 Выход летучих веществ [3, табл. I]

$$V^{daf} = 40,5 \%$$

А.3.5 Температурные характеристики золы [3, табл. II]:

$$t_A = 1160 \text{ }^\circ\text{C}, t_B = 1310 \text{ }^\circ\text{C}, t_C = 1440 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.3.6 Приведенная влажность топлива

$$W_{пр}^r = W_t^r / Q_i^r = 11,5 / 21,9 = 0,53 \text{ \%} \cdot \text{кг/МДж}.$$

А.3.7 Приведенная зольность топлива

$$A_{пр}^r = A^r / Q_i^r = 15,9 / 21,9 = 0,73 \text{ \%} \cdot \text{кг/МДж}.$$

А.3.8 Приведенное содержание серы

$$S_{пр}^r = S_{p+o}^r / Q_i^r = 0,4 / 21,9 = 0,02 \text{ \%} \cdot \text{кг/МДж}.$$

#### А.4 Расчет количества воздуха и объемов и продуктов сгорания

А.4.1 Теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сгорания топлива при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$ ,

$$V_{O}^H = 0,0889 \cdot (C^r + 0,375 \cdot S_{(p+o)}^r) + 0,265 \cdot H^r - 0,0333 \cdot O^r = \\ = 0,0889 \cdot (56,4 + 0,375 \cdot 0,4) + 0,265 \cdot 4,0 - 0,0333 \cdot 9,9 = 5,76 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

А.4.2 Теоретический объем трехатомных газов

$$V_{RO_2}^H = 1,866 \cdot \frac{C^r + 0,375 \cdot S_{p+o}^r}{100} = 1,866 \cdot \frac{56,4 + 0,375 \cdot 0,4}{100} = 1,06 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

А.4.3 Теоретический объем азота

$$V_{ON_2}^H = 0,79 \cdot V_0^H + 0,8 \frac{N^r}{100} = 0,79 \cdot 5,76 + 0,8 \frac{1,9}{100} = 4,57 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

А.4.4 Теоретический объем водяных паров

$$V_{0H_2O}^H = 0,111 \cdot H^r + 0,0124 \cdot W_t^r + 0,016 \cdot V_0^H = \\ = 0,111 \cdot 4,0 + 0,0124 \cdot 11,5 + 0,016 \cdot 5,76 = 0,68 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

А.4.5 Теоретический объем дымовых газов (суммарный)

$$V_{0Г}^H = V_{RO_2}^H + V_{ON_2}^H + V_{0H_2O}^H = 1,06 + 4,57 + 0,68 = 6,31 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

А.4.6 Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки принимается согласно [2, табл. 5.5]

$$\alpha''_t = 1,2$$

А.4.7 Присосы воздуха в газоходы котла принимаются в соответствии с наличием и расположением поверхностей нагрева в рассчитываемом котле [2, табл. 2.2]:

- в топку

$$\Delta\alpha_t = 0,07;$$

- в газоход ширм (2-й ступени пароперегревателя)

$$\Delta\alpha_{ш} = 0;$$

- в газоход 3-й и 4-й ступени пароперегревателя

$$\Delta\alpha_{кпп3,4} = 0,015;$$

- в газоход 1-й ступени пароперегревателя

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

$$\Delta\alpha_{кпп1} = 0,015;$$

- в газоход экономайзера 2-й ступени

$$\Delta\alpha_{Эк2} = 0,02;$$

- в газоход воздухоподогревателя 2-й ступени

$$\Delta\alpha_{Вп2} = 0,03;$$

- в газоход экономайзера 1-й ступени

$$\Delta\alpha_{Эк1} = 0,02;$$

- в газоход воздухоподогревателя 1-й ступени

$$\Delta\alpha_{Вп1} = 0,03.$$

#### А.4.8 Присосы воздуха в систему пылеприготовления [2, табл. 2.3]

$$\Delta\alpha_{пл} = 0,1.$$

А.4.9 Коэффициенты избытка воздуха в газоходах за отдельными поверхностями нагрева котла определяются путем прибавления величины присоса воздуха данной поверхности к коэффициенту избытка воздуха за предыдущей поверхностью. Таким образом, коэффициенты избытка воздуха будут:

- за топкой  $\alpha''_T = 1,2;$

- за ширмами (2-й ступенью пароперегревателя)

$$\alpha''_{ш} = \alpha''_T + \Delta\alpha_{ш} = 1,2 + 0 = 1,2;$$

- за 3-й и 4-й ступенями пароперегревателя

$$\alpha''_{кпп3,4} = \alpha''_{ш} + \Delta\alpha_{кпп3,4} = 1,2 + 0,015 = 1,215;$$

- за 1-й ступенью пароперегревателя

$$\alpha''_{кпп1} = \alpha''_{кпп3,4} + \Delta\alpha_{кпп1} = 1,215 + 0,015 = 1,23;$$

- за 2-й ступенью экономайзера

$$\alpha''_{Эк2} = \alpha''_{кпп1} + \Delta\alpha_{Эк2} = 1,23 + 0,02 = 1,25;$$

- за 2-й ступенью воздухоподогревателя

$$\alpha''_{Вп2} = \alpha''_{Эк2} + \Delta\alpha_{Вп2} = 1,25 + 0,03 = 1,28;$$

- за 1-й ступенью экономайзера

$$\alpha''_{Эк1} = \alpha''_{Вп2} + \Delta\alpha_{Эк1} = 1,28 + 0,02 = 1,3;$$

- за 1-й ступенью воздухоподогревателя

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

$$\alpha''_{\text{Вп1}} = \alpha''_{\text{Эк1}} + \Delta\alpha_{\text{Вп1}} = 1,3 + 0,03 = 1,33.$$

А.4.10 Средние коэффициенты избытка воздуха по газоходах:

- в ширмах (2-й ступени пароперегревателя)

$$\alpha_{\text{ш.ср}} = \frac{\alpha''_{\text{Т}} + \alpha''_{\text{ш}}}{2} = \frac{1,2 + 1,2}{2} = 1,2$$

- в 3-й и 4-й ступенях пароперегревателя

$$\alpha_{\text{кпп3,4.ср}} = \frac{\alpha''_{\text{ш}} + \alpha''_{\text{кпп3,4}}}{2} = \frac{1,2 + 1,215}{2} = 1,208$$

- в 1-й ступени пароперегревателя

$$\alpha_{\text{кпп1.ср}} = \frac{\alpha''_{\text{кпп3,4}} + \alpha''_{\text{кпп1}}}{2} = \frac{1,215 + 1,23}{2} = 1,223$$

- во 2-й ступени экономайзера

$$\alpha_{\text{Эк2.ср}} = \frac{\alpha''_{\text{кпп1}} + \alpha''_{\text{Эк2}}}{2} = \frac{1,23 + 1,25}{2} = 1,24$$

- во 2-й ступени воздухоподогревателя

$$\alpha_{\text{Вп2.ср}} = \frac{\alpha''_{\text{Эк2}} + \alpha''_{\text{Вп2}}}{2} = \frac{1,25 + 1,28}{2} = 1,265$$

- в 1-й ступени экономайзера

$$\alpha_{\text{Эк1.ср}} = \frac{\alpha''_{\text{Вп2}} + \alpha''_{\text{Эк1}}}{2} = \frac{1,28 + 1,3}{2} = 1,29$$

- во 2-й ступени воздухоподогревателя

$$\alpha_{\text{Вп1}} = \frac{\alpha''_{\text{Эк1}} + \alpha''_{\text{Вп1}}}{2} = \frac{1,3 + 1,33}{2} = 1,315$$

А.4.11 Действительные объемы водяных паров и дымовых газов подсчитываются для каждого газохода при средних значениях коэффициента избытка воздуха по формулам:

- объем водяных паров

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}} = V_{0\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}} + 0,0161 \cdot (\alpha_{\text{ср}} - 1) \cdot V_0^{\text{H}}, \text{ м}^3/\text{кг};$$

- объем дымовых газов

$$V_{\text{Г}}^{\text{H}} = V_{\text{RO}_2}^{\text{H}} + V_{0\text{N}_2}^{\text{H}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}} + 0,0161 \cdot (\alpha_{\text{ср}} - 1) \cdot V_0^{\text{H}}, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Результаты расчета действительных объемов водяных паров и дымовых газов занесены в табл. 1. В эту же таблицу занесены объемные доли трехатомных газов  $r_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2}^{\text{H}} / V_{\text{Г}}^{\text{H}}$  и водяных паров  $r_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}} / V_{\text{Г}}^{\text{H}}$ ; общая доля трехатомных газов и водяных паров  $r_{\text{п}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}$ , а также масса дымовых газов

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
						74
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$G_{\Gamma} = 1 - \frac{A^r}{100} + 1,306 \cdot \alpha_{\text{ср}} \cdot V_0^H$  и безразмерная концентрация золовых частиц

$\mu_{\text{зл}} = \frac{A^r \cdot a_{\text{ун}}}{100 \cdot G_{\Gamma}}$ . При этом доля золы, уносимая в газоходы котла,  $a_{\text{ун}} = 0,95$  приня-

та согласно [2, табл. 5.5].

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75



## А.5 Расчет энтальпий воздуха и продуктов сгорания

А.5.1 Энтальпия теоретически необходимого количества воздуха при  $\alpha = 1$  и расчетной температуре  $\vartheta$  определяется по формуле

$$I_{0B} = V_0^H \cdot (c\vartheta)_B, \text{ кДж/кг},$$

где  $(c\vartheta)_B$  - удельная энтальпия воздуха в кДж/м<sup>3</sup>.

А.5.2 Действительная энтальпия продуктов сгорания (дымовых газов) при  $\alpha > 1$  подсчитывается по формуле

$$I_{\Gamma} = I_{0\Gamma} + (\alpha - 1) \cdot I_{0B} + I_{\text{зл}}$$

где  $I_{0\Gamma} = V_{\text{RO}_2}^H \cdot (c\vartheta)_{\text{CO}_2} + V_{\text{0N}_2}^H \cdot (c\vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{0H}_2\text{O}}^H \cdot (c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$  - теоретическая энтальпия продуктов сгорания (при  $\alpha = 1$ ), кДж/кг;

$$I_{\text{зл}} = (c\vartheta)_{\text{зл}} \cdot \frac{A^{\Gamma}}{100} \cdot a_{\text{ун}} - \text{энтальпия летучей золы, кДж/кг};$$

$(c\vartheta)_B$ ,  $(c\vartheta)_{\text{CO}_2}$ ,  $(c\vartheta)_{\text{N}_2}$ ,  $(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$  - удельные энтальпии воздуха, углекислого газа, азота и водяных паров при температуре  $\vartheta$ , кДж/м<sup>3</sup>; принимаются по [2, табл. 3.1];

$(c\vartheta)_{\text{зл}}$  - энтальпия золы в кДж/кг; принимается по [2, табл. 3.1].

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

## А.6 Составление теплового баланса котла и определение расхода топлива

### А.6.1 Располагаемое тепло топлива определяется по формуле

$$Q_p = Q_i^r + i_{\text{тл}} + (1 - k) \cdot Q_{\text{крб}}, \text{ кДж/кг}$$

где  $Q_i^r$  – низшая теплота сгорания рабочего топлива, кДж/кг;

$i_{\text{тл}} = c_{\text{тл}} \cdot t_{\text{тл}}$  – физическое тепло топлива, кДж/кг;

$k$  – коэффициент разложения карбонатов при сжигании карбонатных топлив;

$Q_{\text{крб}}$  – затраты тепла на разложение карбонатов, кДж/кг.

А.6.2 Поскольку заданное топливо не является карбонатным, подогрева топлива не предусмотрено, форсуночное дутье отсутствует,  $Q_{\text{ф}}$ ,  $Q_{\text{крб}}$ ,  $i_{\text{тл}}$  принимаются равными нулю. Следовательно, располагаемое тепло топлива

$$Q_p = Q_i^r = 21900 \text{ кДж/кг.}$$

А.6.3 Потеря тепла от химической неполноты сгорания топлива принимается в соответствии с [2, подразд. 5.19]:

$$q_3 = 0 \text{ \%}.$$

А.6.4 Потеря тепла от механической неполноты сгорания топлива принимается по данным [2, табл. 5.5]:

$$q_4 = 1,0 \text{ \%}.$$

### А.6.5 Потеря теплоты от наружного охлаждения

$$q_5 = \frac{(60/D_{\text{пе}})^{0,5}}{\lg D_{\text{пе}}} = \frac{(60/58,33)^{0,5}}{\lg 58,33} = 0,57\%$$

### А.6.6 Доля золы топлива, переходящая в шлак,

$$a_{\text{шл}} = 1 - a_{\text{yh}} = 1 - 0,95 = 0,05.$$

### А.6.7 Температура удаляемого шлака, принимаемая по [2, подразд. 5.22],

$$g_{\text{шл}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}.$$

### А.6.8 Энтальпия удаляемого шлака, при $g_{\text{шл}}$ согласно [2, табл. 5.2],

$$(c_g)_{\text{зл}}^{g_{\text{шл}}} = 560 \text{ кДж/кг.}$$

### А.6.9 Потеря с физическим теплом шлака

$$q_6 = \frac{a_{\text{шл}} \cdot (c_g)_{\text{зл}}^{g_{\text{шл}}} \cdot A^r}{Q_p} = \frac{0,05 \cdot 560 \cdot 15,9}{21900} = 0,02$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

А.6.10 Температура уходящих газов принимается с последующим ее уточнением:

$$g_{yx} = 126 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.6.11 Энтальпия уходящих газов, взятая при  $g_{yx}$  по табл. 2,

$$I_{yx} = 1448 \text{ кДж/кг}.$$

А.6.12 Средняя температура горячего воздуха, присасываемого в газоходы воздухоподогревателя (принимается),

$$t_{\text{ср.вп}} = 180 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.6.13 Энтальпия горячего воздуха, присасываемого в газоходы воздухоподогревателя при средней температуре (см. табл. 2),

$$I_{0 \text{ прс.гв}} = 1383 \text{ кДж/кг}.$$

А.6.14 Температура воздуха, присасываемого в газоходы поверхностей нагрева, кроме воздухоподогревателя, принимается равной температуре холодного воздуха

$$t_{\text{прс}} = t_{\text{хв}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.6.15 Энтальпия присасываемого в котел холодного воздуха (см. табл. 2)

$$I_{0 \text{ прс.хв}} = I_{0 \text{ хв}} = 229 \text{ кДж/кг}.$$

А.6.16 Средневзвешенная энтальпия присасываемого воздуха

$$I_{0 \text{ прс}} = \frac{\left( \Delta\alpha_{\text{т}} + \sum_1^4 \Delta\alpha_{\text{Кппи}} + \sum_1^2 \Delta\alpha_{\text{Эки}} \right) \cdot I_{0 \text{ прс.хв}} + \sum_1^2 \Delta\alpha_{\text{Впи}} \cdot I_{0 \text{ прс.гв}}}{\Delta\alpha_{\text{т}} + \sum_1^4 \Delta\alpha_{\text{Кппи}} + \sum_1^2 \Delta\alpha_{\text{Эки}} + \sum_1^2 \Delta\alpha_{\text{Впи}}} =$$

$$= \frac{(0,07 + 0,03 + 0,04) \cdot 229 + 0,06 \cdot 1383}{0,07 + 0,03 + 0,04 + 0,06} = 575 \text{ кДж / кг}$$

А.6.17 Отношение количества воздуха, подаваемого в топку из воздухоподогревателя, к теоретически необходимому, при отсутствии рециркуляции газов ( $r_{\text{rc}} = 0$ ),

$$\beta'_{\text{т}} = \alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{пл}} = 1,2 - 0,07 - 0,1 = 1,03.$$

А.6.18 Отношение количества воздуха на входе в воздушный тракт к теоретически необходимому

						Лист
						78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\beta' = \beta'_T + \Delta\alpha_{ВП} = 1,03 + 0,06 = 1,09,$$

где  $\Delta\alpha_{ВП} = 0,06$  – суммарная величина присоса воздуха в обеих ступенях воздухоподогревателя.

#### А.6.19 Потеря тепла с уходящими газами

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p} \cdot 100 = \frac{[I_{yx} - (\alpha_{yx} - \beta') \cdot I_{0прс} - \beta' \cdot I_{0.хв}]}{Q_p} \cdot (100 - q_4) =$$

$$= \frac{[1448 - (1,33 - 1,09) \cdot 575 - 1,09 \cdot 229]}{21900} \cdot (100 - 1,0) = 4,79\%$$

#### А.6.20. Коэффициент полезного действия (КПД) котла

$$\eta_k = 100 - \Sigma q = 100 - (4,79 + 0 + 1,0 + 0,57 + 0,02) = 93,62 \%$$

#### А.6.21 Коэффициент сохранения тепла

$$\phi = 1 - \frac{q_5}{\eta_k + q_5} = 1 - \frac{0,57}{93,62 + 0,57} = 0,994$$

#### А.6.22 Расход перегретого пара

$$D_{пе} = 58,33 \text{ кг/с (210 т/ч).}$$

Во всех последующих расчетах  $D_{пе}$  используется в кг/с.

#### А.6.23 Расход продувочной воды

$$D_{пр} = D_{пе} \cdot \frac{P_{пр}}{100} = 58,33 \cdot \frac{5}{100} = 2,92 \text{ кг/с.}$$

#### А.6.24 Давление перегретого пара

$$p_{пе} = 14,0 \text{ МПа.}$$

#### А.6.25 Температура перегретого пара

$$t_{пе} = 545 \text{ }^\circ\text{C.}$$

#### А.6.26 Энтальпия перегретого пара [2, табл. 5.9]

$$i_{пе} = 3447,6 \text{ кДж/кг.}$$

А.6.27 Давление питательной воды на входе в котел (принимается на 20 % бóльшим давления перегретого пара)

$$p_{п.в} = 1,2 \cdot p_{пе} = 1,2 \cdot 14,0 = 16,8 \text{ МПа.}$$

#### А.6.28 Температура питательной воды

$$t_{п.в} = 230 \text{ }^\circ\text{C.}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						79
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

А.6.29 Энтальпия питательной воды при давлении  $p_{п.в}$  и температуре  $t_{п.в}$  [2, табл. 5.8]

$$i_{п.в} = 993,5 \text{ кДж/кг.}$$

А.6.30 Давление среды в барабане (принимается на 10 % большим давления перегретого пара)

$$p_6 = p'_s = 1,1 \cdot 14,0 = 15,4 \text{ МПа.}$$

А.6.31 Температура насыщения при давлении  $p_6$  [2, табл. 5.7]

$$t_s = 344,3 \text{ }^\circ\text{C.}$$

А.6.32 Энтальпия насыщенного пара при давлении  $p_6$  [2, табл. 5.7]

$$i''_s = 2600 \text{ кДж/кг.}$$

А.6.33 Энтальпия продувочной (кипящей) воды при давлении в барабане [2, табл. 5.7]

$$i'_s = 1625,9 \text{ кДж/кг.}$$

А.6.34 Полное количество тепла, полезно используемое в котле при отсутствии расхода питательной воды, подаваемой мимо регенеративных подогревателей ( $D_{отб} = 0$ ), впрысков посторонней воды в первичный тракт ( $D_{впр}^{ст} = 0$ ), отбора насыщенного пара ( $D_{н.п} = 0$ ), отбора подогретой воды ( $Q_{отв} = 0$ ), отбора подогретого избыточного воздуха ( $Q_{изб} = 0$ ) и отсутствия промперегревателя ( $D_{пп} = 0$ ,  $D_{впр}^{пп} = 0$ ),

$$\begin{aligned} Q_k &= D_{пе} \cdot (i_{пе} - i_{п.в}) + D_{пр} \cdot (i'_s - i_{п.в}) = \\ &= 58,33 \cdot (3447,6 - 993,5) + 2,92 \cdot (1625,9 - 993,5) = 144994 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

А.6.35 Полный расход топлива, подаваемого в топку,

$$B = \frac{Q_k}{\frac{Q_p \cdot \eta_k}{100} + Q_{в.вн} + Q_\phi} = \frac{144994}{\frac{21900 \cdot 93,62}{100} + 0 + 0} = 7,07 \text{ кг/с}$$

А.6.36 Расчетный расход топлива (с учетом механической неполноты его сгорания)

$$B_p = B \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) = 7,07 \cdot \left(1 - \frac{1,0}{100}\right) = 7,0 \text{ кг/с (25,2 т/ч)}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		80

Во всех последующих расчетах расчетный расход топлива  $V_p$  используется исключительно в кг/с.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

## А.7 Тепловой расчет воздухоподогревателя первой ступени

### А.7.1 Конструктивные характеристики Вп1:

- Тип ступени – трехходовая.
- Диаметр труб наружный  $d = 40$  мм.
- Диаметр труб внутренний  $d_{\text{вн}} = 37$  мм.
- Поперечный шаг труб  $S_1 = 60$  мм.
- Относительный поперечный шаг труб  $\sigma_1 = 1,5$ .
- Продольный шаг труб  $S_2 = 40,5$  мм.
- Относительный продольный шаг труб  $\sigma_2 = S_2/d = 1,01$ .
- Средний относительный диагональный шаг труб  $\sigma'_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} - \sigma_2^2} = 1,26$ .
- Коэффициент  $\phi = (\sigma_1 - 1)/(\sigma'_2 - 1) = 1,92$ .
- Сечение для прохода воздуха  $f_b = 16,4$  м<sup>2</sup>.
- Сечение для прохода газов  $F_r = 10,7$  м<sup>2</sup>.
- Поверхность нагрева  $H = 10640$  м<sup>2</sup>.
- Число рядов труб по ходу газов  $z_2 = 38$ .
- Глубина пакета  $l_{\text{п}} = 3,0$  м.
- Глубина газового объема  $l_{\text{об}} = 1,1$  м.

А.7.2 Температура газов на выходе из Вп1 принимается равной температуре уходящих газов:

$$\vartheta'_r = \vartheta_{\text{yx}} = 126^\circ\text{C} \text{ (399 K)}.$$

А.7.3 Энтальпия газов на выходе из Вп1 принимается равной энтальпии уходящих газов:

$$I''_r = I_{\text{yx}} = 1448 \text{ кДж/кг}.$$

А.7.4 Температура воздуха на входе в Вп1 принимается равной температуре холодного воздуха, т. к. его подогрев вне котла не предусмотрен:

$$t'_b = t_{\text{xb}} = 30^\circ\text{C}.$$

### А.7.5 Энтальпия воздуха на входе в Вп1

$$I'_b = I_{0\text{xb}} = 229 \text{ кДж/кг}.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

А.7.6 Температура воздуха на выходе из Вп1 принимается с последующим уточнением:

$$t''_B = 232 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.7.7 Энтальпия воздуха на выходе (по табл. 2)

$$I''_{0\text{ГВ}} = 1789 \text{ кДж/кг}.$$

А.7.8 Средняя температура воздуха

$$t_{\text{в.ср}} = \frac{t'_B + t''_B}{2} = \frac{30 + 232}{2} = 131 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.7.9 Энтальпия присасываемого воздуха при средней температуре (определяется по табл. 2)

$$I_{0\text{прс}} = I_{\text{в.ср}} = 1004 \text{ кДж/кг}.$$

А.7.10 Отношение количества воздуха, подаваемого в топку из воздухоподогревателя к теоретически необходимому,

$$\beta'_T = 1,03.$$

А.7.11 Количество воздуха, подогреваемого в Вп1 (относительно теоретически необходимого),

$$\beta_{\text{Вп1}} = \beta'_T + \Delta\alpha_{\text{Вп2}} + \Delta\alpha_{\text{Вп1}} = 1,03 + 0,03 + 0,03 = 1,09.$$

А.7.12 Тепло, воспринимаемое воздухом по уравнению теплового баланса,

$$Q_6 = \beta_{\text{Вп1}} \cdot (I''_{0\text{ГВ}} - I'_B) = 1,09 \cdot (1789 - 229) = 1700 \text{ кДж/кг}.$$

А.7.13 Энтальпия дымовых газов на входе в Вп1

$$I'_Г = I''_Г + \frac{Q_6}{\phi} - \Delta\alpha_{\text{Вп1}} \cdot I_{0\text{прс}} = 1448 + \frac{1700}{0,994} - 0,03 \cdot 1004 = 3128 \text{ кДж/кг}.$$

А.7.14 Температура дымовых газов на входе в Вп1 определяется по табл. 2 при  $I'_Г$  в столбце «за Эк1»:

$$\vartheta'_Г = 273 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (546 K)}$$

А.7.15 Средняя температура дымовых газов:

$$\vartheta_{\text{Г.ср}} = \frac{\vartheta'_Г + \vartheta''_Г}{2} = \frac{273 + 126}{2} = 199,5 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (473 K)}$$

А.7.16 Скорость дымовых газов

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		83

$$w_{\Gamma} = \frac{B_p \cdot V_{\Gamma}^H \cdot (t_{\Gamma, \text{cp}} + 273)}{F_{\Gamma} \cdot 273} = \frac{7,0 \cdot 8,153 \cdot (199,5 + 273)}{10,7 \cdot 273} = 9,23 \text{ м/с.}$$

А.7.17 Коэффициент теплопроводности газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$\lambda_{\Gamma} \cdot 10^2 = 4,0 \text{ Вт (м·К).}$$

А.7.18 Коэффициент кинематической вязкости газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$\nu_{\Gamma} \cdot 10^6 = 31,5 \text{ м}^2/\text{с.}$$

А.7.19 Критерий Прандтля для газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$\text{Pr}_{\Gamma} = 0,67.$$

А.7.20 Поправка на температуру потока газов [2, п. 10.3.7]

$$C_t = 1,0.$$

А.7.21 Поправка на длину канала [2, п. 10.3.7]

$$C_l = 1,0.$$

А.7.22 Поправка на форму канала [2, п. 10.3.7]

$$C_k = 1,0.$$

А.7.23 Коэффициент теплоотдачи конвекцией от дымовых газов к стенке [2, п. 10.3.7]

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\Gamma}}{d_{\text{BH}}} \cdot \left( \frac{w_{\Gamma} \cdot d_{\text{BH}}}{\nu_{\Gamma}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_k = \\ &= 0,023 \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-2}}{0,037} \cdot \left( \frac{9,23 \cdot 0,037}{31,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,67^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 35,82 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.7.24 Расчетная скорость воздуха

$$w_{\text{в}} = \frac{B_p \cdot \beta_{\text{ВП}} \cdot V_0^H \cdot (t_{\text{в, cp}} + 273)}{f_{\text{в}} \cdot 273} = \frac{7,0 \cdot 1,09 \cdot 5,76 \cdot (131 + 273)}{16,4 \cdot 273} = 3,97 \text{ м/с.}$$

А.7.25 Коэффициент теплопроводности воздуха [2, разд. 10]

$$\lambda_{\text{в}} \cdot 10^2 = 3,4 \text{ Вт (м·К).}$$

А.7.26 Коэффициент кинематической вязкости воздуха [2, разд. 10]

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84

$$v_B \cdot 10^6 = 27,2 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.7.27 Критерий Прандтля для воздуха [2, разд. 10]

$$\text{Pr}_B = 0,69.$$

А.7.28 Поправка на число рядов в пучке по ходу воздуха [2, п. 10.3.4]

$$C_z = 1,0.$$

А.7.29 Средний относительный диагональный шаг труб

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} - \sigma_2^2} = 1,26.$$

А.7.30 Величина

$$\phi = (\sigma_1 - 1)/(\sigma'_2 - 1) = 1,92.$$

А.7.31 Поправка на компоновку пучка [2, п. 10.3.4]

$$C_s = 0,95 \cdot \phi^{0,1} = 0,95 \cdot 1,92^{0,1} = 1,01.$$

А.7.32 Коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху [2, п. 10.3.4]

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0,36 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_B}{d} \cdot \left( \frac{w_B \cdot d}{v_B} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} = \\ &= 0,36 \cdot 1 \cdot 1,01 \cdot \frac{3,4 \cdot 10^{-2}}{0,04} \cdot \left( \frac{3,97 \cdot 0,04}{27,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,69^{0,33} = 49,73 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.7.33 Эффективная толщина излучающего слоя [2, п. 10.3.15]

$$s = 0,9 \cdot d_{\text{вн}} = 0,9 \cdot 0,037 = 0,033 \text{ м}.$$

А.7.34 Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания [2, п. 6.3.4]

$$\begin{aligned} k_r &= k_r^0 \cdot r_{\text{п}} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_{\text{п}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{г.ср}}) \cdot r_{\text{п}} = \\ &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,087}{\sqrt{10 \cdot 0,1 \cdot 0,217 \cdot 0,033}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 473) \cdot 0,217 = 19,16 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})} \end{aligned}$$

А.7.35 Коэффициент  $A_{\text{зл}}$  для топлива [2, табл. 6.1]

$$A_{\text{зл}} = 0,8.$$

А.7.36 Коэффициент поглощения лучей частицами летучей золы

										Лист
										85
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА 311085.001.ПЗ					

$$k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}} = \frac{10^4 \cdot A_{\text{зл}}}{\sqrt[3]{(T_{\text{г.ср}})^2}} \cdot \frac{\mu_{\text{зл}}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{\text{зл}} \cdot s} = \frac{10^4 \cdot 0,8}{\sqrt[3]{473^2}} \cdot \frac{0,014}{1 + 1,2 \cdot 0,014 \cdot 0,033} = 1,84 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.7.37 Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока при сжигании заданного топлива

$$kps = (k_{\text{г}}^0 \cdot r_{\text{г}} + k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}}) \cdot p \cdot s = (19,16 + 1,84) \cdot 0,1 \cdot 0,033 = 0,069.$$

А.7.38 Степень черноты потока газов, при средней температуре  $T_{\text{г.ср}}$  и давлении  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ,

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,069} = 0,067.$$

А.7.39 Степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающей поверхности [2, п. 10.3.12]

$$a_3 = 0,8.$$

А.7.40 Абсолютная температура загрязненной наружной поверхности труб воздухоподогревателя

$$T_3 = \frac{T_{\text{г.ср}} + T_{\text{в.ср}}}{2} = \frac{473 + 404}{2} = 438,5 \text{ К}.$$

А.7.41 Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания

$$\alpha_{\text{л}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{\text{г.ср}})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_3}{T_{\text{г.ср}}}\right)^4}{1 - \frac{T_3}{T_{\text{г.ср}}}} =$$

$$= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,067 \cdot (473)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{438,5}{473}\right)^4}{1 - \frac{438,5}{473}} = 1,3 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.7.42 Коэффициент А для заданного топлива [2, п. 10.3.16]

$$A = 0,4.$$

А.7.43 Коэффициент теплоотдачи, с учетом излучения газовых объемов в межтрубном пространстве,

$$\alpha'_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \cdot \left[ 1 + A \cdot \left( \frac{T'_r}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{l_{\text{об}}}{l_{\text{п}}} \right)^{0,07} \right] = 1,3 \cdot \left[ 1 + 0,5 \cdot \left( \frac{546}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{1}{3} \right)^{0,07} \right] = 1,82 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

A.7.44 Коэффициент использования поверхности нагрева [2, п. 10.4.1]

$$\xi = 1,0.$$

A.7.45 Коэффициент теплоотдачи от газов к стенкам труб

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_{\text{к}} + \alpha'_{\text{л}}) = 1,0 \cdot (35,82 + 1,82) = 37,64 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

A.7.46 Коэффициент тепловой эффективности, учитывающий влияние загрязнения поверхности, неполноты омывания ее газами и воздухом, перетоков воздуха [2, п. 10.4.4],

$$\psi = 0,9.$$

A.7.47 Коэффициент теплопередачи [2, разд. 10]

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,9 \cdot 37,64}{1 + \frac{37,64}{49,73}} = 19,28 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

A.7.48 Разность температур на входе в ступень

$$\Delta t' = v'_r - t''_b = 273 - 232 = 41 \text{ }^\circ\text{C}.$$

A.7.49 Разность температур на выходе из ступени

$$\Delta t'' = v''_r - t'_b = 130 - 30 = 100 \text{ }^\circ\text{C}.$$

A.7.50 Температурный напор в ступени при прямотоке

$$\Delta t_{\text{прт}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \left( \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \right)} = \frac{100 - 41}{\ln \left( \frac{100}{41} \right)} = 66,17 \text{ }^\circ\text{C}$$

A.7.51 Большой перепад температуры среды:

$$\tau_{\text{б}} = t_b'' - t_b' = 232 - 30 = 202 \text{ }^\circ\text{C}.$$

A.7.52 Меньший перепад температуры среды:

$$\tau_{\text{м}} = v'_r - v''_r = 273 - 130 = 143 \text{ }^\circ\text{C}.$$

A.7.53 Параметр

$$R = \frac{\tau_{\text{б}}}{\tau_{\text{м}}} = \frac{202}{143} = 1,41$$

										Лист
										87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

А.7.54 Параметр

$$P = \frac{\tau_m}{v'_r - t'_b} = \frac{143}{273 - 30} = 0,59$$

А.7.55 Коэффициент пересчета противоточной схемы на более сложную [2, рис. 11.7]

$$\psi = 0,89.$$

А.7.56 Расчетный температурный напор в ступени

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{\text{прт}} = 0,89 \cdot 66,17 = 58,89 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.7.57 Тепло, передаваемое ступени по уравнению теплопередачи,

$$Q_r = \frac{K \cdot \Delta t \cdot H}{B_p} = \frac{19,28 \cdot 10^{-3} \cdot 58,89 \cdot 10640}{7,0} = 1725 \text{ кДж/кг}.$$

А.7.58 Невязка теплового баланса ступени

$$|\Delta Q| = \frac{(Q_6 - Q_r) \cdot 100}{Q_6} = \frac{1700 - 1725}{1700} \cdot 100 = 1,47\%$$

А.7.59 Допустимая абсолютная невязка теплового баланса – менее чем 2 %.

Уточнения расчета не требуется.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		88

## А.8 Тепловой расчёт экономайзера первой ступени

### А.8.1 Конструктивные характеристики экономайзера первой ступени (Эк1):

- Тип ступени – змеевиковая, шахматная, противоточная.
- Диаметр труб наружный  $d = 32$  мм.
- Диаметр труб внутренний  $d_{\text{вн}} = 24$  мм.
- Поперечный шаг труб  $S_1 = 75$  мм.
- Относительный поперечный шаг труб  $\sigma_1 = S_1/d = 2,34$ .
- Продольный шаг труб  $S_2 = 46$  мм.
- Относительный продольный шаг труб  $\sigma_2 = S_2/d = 1,44$ .
- Средний относительный диагональный шаг труб  $\sigma'_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} - \sigma_2^2} = 1,85$ .
- Коэффициент  $\phi = (\sigma_1 - 1)/(\sigma'_2 - 1) = 1,57$ .
- Сечение для прохода воды  $f_{\text{в}} = 0,081$  м<sup>2</sup>.
- Сечение для прохода газов  $F_{\text{г}} = 19,8$  м<sup>2</sup>.
- Поверхность нагрева  $H = 1210$  м<sup>2</sup>.
- Число рядов труб по ходу газов  $z_2 = 32$ .
- Глубина пакета  $l_{\text{п}} = 1,46$  м.
- Глубина газового объема  $l_{\text{об}} = 0,5$  м.

А.8.2 Температура газов на выходе из Эк1 принимается равной температуре газов на входе в Вп1:

$$g''_{\text{г}} = 273^{\circ}\text{C} \text{ (546 K)}.$$

А.8.3 Энтальпия газов на выходе из Эк1 принимается равной энтальпии газов на входе в Вп1:

$$I''_{\text{г}} = 3128 \text{ кДж/кг}.$$

А.8.4 Температура воды на входе в Эк1 принимается равной температуре питательной воды

$$t'_{\text{в}} = t_{\text{п.в}} = 230^{\circ}\text{C}.$$

А.8.5 Давление воды на входе в Эк1 принимается равным давлению перегретого пара, увеличенному на 20 %:

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		89

$$p'_в = 1,2 \cdot p_{пе} = 1,2 \cdot 14 = 16,8 \text{ МПа.}$$

А.8.6 Энтальпия воды на входе, при  $t'_в$  и  $p'_в$  [2, табл. 5.8],

$$i'_в = 994 \text{ кДж/кг.}$$

А.8.7 Температура воды на выходе из Эк1 принимается предварительно с последующим уточнением:

$$t''_в = 246 \text{ }^\circ\text{C.}$$

А.8.8 Давление воды на выходе из Эк1 принимается равным давлению перегретого пара, увеличенному на 15 %:

$$p''_в = 1,15 \cdot p_{пе} = 1,15 \cdot 14 = 16,1 \text{ МПа.}$$

А.8.9 Энтальпия воды на выходе, при  $t''_в$  и  $p''_в$  [2, табл. 5.8],

$$i''_в = 1067 \text{ кДж/кг.}$$

А.8.10 Средняя температура воды

$$t_{в.ср} = \frac{t'_в + t''_в}{2} = \frac{230 + 246}{2} = 238 \text{ }^\circ\text{C} (511 \text{ K}).$$

А.8.11 Среднее давление воды

$$p_{в.ср} = \frac{p'_в + p''_в}{2} = \frac{16,8 + 16,1}{2} = 16,45 \text{ МПа.}$$

А.8.12 Удельный объем воды, при  $t_{в.ср}$  и  $p_{в.ср}$  [2, табл. 5.8],

$$v_в \cdot 10^2 = 0,12061 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

А.8.13 Расход воды в ступени

$$D_{Эк1} = D_{пе} + D_{пр} = 58,33 + 2,92 = 61,25 \text{ кг/с.}$$

А.8.14 Тепло, воспринимаемое водой по уравнению теплового баланса,

$$Q_{б.Эк1} = \frac{D_{Эк1}}{B_p} \cdot (i''_в - i'_в) = \frac{61,25}{7,0} \cdot (1067 - 994) = 638 \text{ кДж/кг.}$$

А.8.15 Энтальпия дымовых газов на входе в ступень

$$I'_г = I''_г + \frac{Q_{б.Эк1}}{\phi} - \Delta\alpha_{Эк1} \cdot I_{0прс} = 3128 + \frac{638}{0,994} - 0,02 \cdot 229 = 3766 \text{ кДж/кг.}$$

А.8.16 Температура дымовых газов на входе в Эк1 определяется по табл. 2 при  $I'_г$  в столбце «за Вп2»:

$$\vartheta'_г = 331 \text{ }^\circ\text{C} (604 \text{ K})$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						90
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

А.8.17 Средняя температура дымовых газов:

$$\vartheta_{r,cp} = \frac{\vartheta'_r + \vartheta''_r}{2} = \frac{331 + 273}{2} = 302^\circ\text{C} \text{ (575 K)}$$

А.8.18 Средняя скорость дымовых газов

$$w_r = \frac{B_p \cdot V_r^H \cdot (\vartheta_{r,cp} + 273)}{F_r \cdot 273} = \frac{7,0 \cdot 8,007 \cdot (302 + 273)}{19,8 \cdot 273} = 5,96 \text{ м/с.}$$

А.8.19 Средняя скорость воды

$$w_b = \frac{D_{\text{Экл}} \cdot v_b}{f_b} = \frac{61,25 \cdot 0,12061 \cdot 10^{-2}}{0,081} = 0,91 \text{ м/с.}$$

А.8.20 Коэффициент теплопроводности газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$\lambda_r \cdot 10^2 = 4,84 \text{ Вт (м}\cdot\text{К)}.$$

А.8.21 Коэффициент кинематической вязкости газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$v_r \cdot 10^6 = 44,2 \text{ м}^2\text{/с.}$$

А.8.22 Критерий Прандтля для газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$Pr_r = 0,65.$$

А.8.23 Поправка на число рядов по ходу воздуха [2, п. 10.3.4]

$$C_z = 1,0.$$

А.8.24 Поправка на компоновку пучка [2, п. 10.3.4]

$$C_s = 0,99.$$

А.8.25 Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенкам труб экономайзера [2, п. 10.3.4]

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,36 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_r}{d} \cdot \left( \frac{w_r \cdot d}{v_r} \right)^{0,6} \cdot Pr_r^{0,33} = \\ &= 0,36 \cdot 1 \cdot 0,99 \cdot \frac{4,84 \cdot 10^{-2}}{0,032} \cdot \left( \frac{5,96 \cdot 0,032}{44,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,65^{0,33} = 70,94 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.8.26 Эффективная толщина излучающего слоя [2, п. 10.3.15]

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		91

$$s = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left( \frac{4}{3,14} \cdot 2,34 \cdot 1,44 - 1 \right) = 0,095 \text{ м.}$$

А.8.27 Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания [2, п. 6.3.4]

$$k_r = k_r^0 \cdot r_n = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_n \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_{г.ср}) \cdot r_n =$$

$$= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,088}{\sqrt{10 \cdot 0,1 \cdot 0,22 \cdot 0,095}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 575) \cdot 0,22 = 10,78 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.8.28 Коэффициент  $A_{зл}$  для топлива [2, табл. 6.1]

$$A_{зл} = 0,8.$$

А.8.29 Коэффициент поглощения лучей частицами летучей золы

$$k_{зл} \cdot \mu_{зл} = \frac{10^4 \cdot A_{зл}}{\sqrt[3]{(T_{г.ср})^2}} \cdot \frac{\mu_{зл}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{зл} \cdot s} = \frac{10^4 \cdot 0,8}{\sqrt[3]{575^2}} \cdot \frac{0,014}{1 + 1,2 \cdot 0,014 \cdot 0,095} = 1,62 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}.$$

А.8.30 Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока при сжигании заданного топлива

$$kps = (k_r^0 \cdot r_n + k_{зл} \cdot \mu_{зл}) \cdot p \cdot s = (10,78 + 1,62) \cdot 0,1 \cdot 0,095 = 0,118.$$

А.8.31 Степень черноты потока газов, при средней температуре  $T_{г.ср}$  и давлении  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ,

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,118} = 0,111.$$

А.8.32 Степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающей поверхности [2, п. 10.3.12]

$$a_3 = 0,8.$$

А.8.33 Абсолютная температура загрязненной наружной поверхности труб экономайзера [2, п. 10.3.13]

$$t_3 = t_{в.ср} + 25 = 238 + 25 = 263 \text{ }^\circ\text{C} (536 \text{ К}).$$

А.8.34 Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		92

$$\alpha_{\text{л}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{\text{г.сп}})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_3}{T_{\text{г.сп}}}\right)^4}{1 - \frac{T_3}{T_{\text{г.сп}}}} =$$

$$= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,111 \cdot (575)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{536}{575}\right)^4}{1 - \frac{536}{575}} = 3,89 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.8.35 Коэффициент А для заданного топлива [2, п. 10.3.16]

$$A = 0,4.$$

А.8.36 Коэффициент теплоотдачи, с учетом излучения газовых объемов в межтрубном пространстве,

$$\alpha'_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \cdot \left[ 1 + A \cdot \left(\frac{T'_{\text{г}}}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{1_{\text{ог}}}{1_{\text{п}}}\right)^{0,07} \right] = 3,89 \cdot \left[ 1 + 0,4 \cdot \left(\frac{604}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,5}{1,46}\right)^{0,07} \right] = 5,16 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.8.37 Коэффициент использования поверхности нагрева [2, п. 10.4.1]

$$\xi = 1,0.$$

А.8.38 Коэффициент теплоотдачи от газов к стенкам труб

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_{\text{к}} + \alpha'_{\text{л}}) = 1,0 \cdot (70,94 + 5,16) = 76,1 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

А.8.39 Коэффициент тепловой эффективности, учитывающий влияние загрязнения поверхности, неполноты омывания ее дымовыми газами [2, п. 10.4.4],

$$\psi = 0,77.$$

А.8.40 Коэффициент теплопередачи [2, разд. 10]

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,77 \cdot 76,1 = 58,6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

А.8.41 Разность температур на входе в ступень

$$\Delta t' = v'_{\text{г}} - t''_{\text{в}} = 331 - 246 = 85 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

А.8.42 Разность температур на выходе из ступени

$$\Delta t'' = v''_{\text{г}} - t'_{\text{в}} = 273 - 230 = 43 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

А.8.43 Температурный напор в ступени при противотоке

$$\Delta t_{\text{прт}} = \frac{\Delta t_{\text{г}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{85 - 43}{\ln\left(\frac{85}{43}\right)} = 61,63 \text{ } ^\circ\text{С}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		93

А.8.44 Тепло, передаваемое ступени по уравнению теплопередачи,

$$Q_{\tau} = \frac{K \cdot \Delta t \cdot H}{B_p} = \frac{58,6 \cdot 10^{-3} \cdot 61,63 \cdot 1210}{7,0} = 628 \text{ кДж/кг.}$$

А.8.45 Невязка теплового баланса ступени

$$|\Delta Q| = \frac{(Q_6 - Q_{\tau}) \cdot 100}{Q_6} = \frac{638 - 628}{638} \cdot 100 = 1,57\%$$

А.8.46 Допустимая абсолютная невязка теплового баланса – менее чем 2 %.

Уточнения расчета не требуется.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		94

## А.9 Тепловой расчет воздухоподогревателя второй ступени

### А.9.1 Конструктивные характеристики Вп2:

- Тип ступени – одноходовая.
- Диаметр труб наружный  $d = 40$  мм.
- Диаметр труб внутренний  $d_{\text{вн}} = 37$  мм.
- Поперечный шаг труб  $S_1 = 60$  мм.
- Относительный поперечный шаг труб  $\sigma_1 = 1,5$ .
- Продольный шаг труб  $S_2 = 40,5$  мм.
- Относительный продольный шаг труб  $\sigma_2 = S_2/d = 1,01$ .
- Средний относительный диагональный шаг труб  $\sigma'_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} - \sigma_2^2} = 1,26$ .
- Коэффициент  $\phi = (\sigma_1 - 1)/(\sigma'_2 - 1) = 1,92$ .
- Сечение для прохода воздуха  $f_b = 21,8$  м<sup>2</sup>.
- Сечение для прохода газов  $F_r = 12,8$  м<sup>2</sup>.
- Поверхность нагрева  $H = 5216$  м<sup>2</sup>.
- Число рядов труб по ходу газов  $z_2 = 38$ .
- Глубина пакета  $l_{\text{п}} = 3,4$  м.
- Глубина газового объема  $l_{\text{об}} = 1,5$  м.

А.9.2 Температура газов на выходе из Вп2 принимается равной температуре газов на входе в Эк1:

$$g'_r = 331^\circ\text{C} \text{ (604 K)}.$$

А.9.3 Энтальпия газов на выходе из Вп2 принимается равной энтальпии газов на входе в Эк1:

$$I''_r = 3766 \text{ кДж/кг}.$$

А.9.4 Температура воздуха на входе в Вп2 принимается равной температуре воздуха на выходе из Вп1:

$$t'_b = 232^\circ\text{C}.$$

А.9.5 Энтальпия воздуха на входе в Вп1

$$I'_{0\text{ГВ}} = 1789 \text{ кДж/кг}.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		95

А.9.6 Температура воздуха на выходе из Вп2 принимается с последующим уточнением:

$$t''_B = 350 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.9.7 Энтальпия воздуха на выходе (по табл. 2)

$$I''_{0_{ГВ}} = 2722 \text{ кДж/кг}.$$

А.9.8 Средняя температура воздуха

$$t_{B,CP} = \frac{t'_B + t''_B}{2} = \frac{232 + 350}{2} = 291 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.9.9 Энтальпия присасываемого воздуха при средней температуре (определяется по табл. 2)

$$I_{0_{прс}} = I_{B,CP} = 2251 \text{ кДж/кг}.$$

А.9.10 Количество воздуха относительно теоретически необходимого, подогреваемого в Вп2,

$$\beta_{Вп2} = \beta_{Вп1} - \Delta\alpha_{Вп1} = 1,09 - 0,03 = 1,06.$$

А.9.11 Тепло, воспринимаемое воздухом по уравнению теплового баланса,

$$Q_6 = \beta_{Вп1} \cdot (I''_{0_{ГВ}} - I'_B) = 1,06 \cdot (2722 - 1789) = 989 \text{ кДж/кг}.$$

А.9.12 Энтальпия дымовых газов на входе в Вп2

$$I'_Г = I''_Г + \frac{Q_6}{\phi} - \Delta\alpha_{Вп2} \cdot I_{0_{прс}} = 3766 + \frac{989}{0,994} - 0,03 \cdot 2251 = 4693 \text{ кДж/кг}.$$

А.9.13 Температура дымовых газов на входе в Вп2 определяется по табл. 2 при  $I'_Г$  в столбце «за Эк2»:

$$\vartheta'_Г = 416 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (689 K)}$$

А.9.14 Средняя температура дымовых газов:

$$\vartheta_{Г,CP} = \frac{\vartheta'_Г + \vartheta''_Г}{2} = \frac{416 + 331}{2} = 373,5 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (647 K)}$$

А.9.15 Скорость дымовых газов

$$w_Г = \frac{B_p \cdot V_Г^H \cdot (\vartheta_{Г,CP} + 273)}{F_Г \cdot 273} = \frac{7,0 \cdot 7,861 \cdot (373,5 + 273)}{12,8 \cdot 273} = 10,18 \text{ м/с}.$$

А.9.16 Коэффициент теплопроводности газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		96

$$\lambda_{\Gamma} \cdot 10^2 = 5,45 \text{ Вт (м·К)}.$$

А.9.17 Коэффициент кинематической вязкости газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$v_{\Gamma} \cdot 10^6 = 54,1 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.9.18 Критерий Прандтля для газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$Pr_{\Gamma} = 0,643.$$

А.9.19 Поправка на температуру потока газов [2, п. 10.3.7]

$$C_t = 1,0.$$

А.9.20 Поправка на длину канала [2, п. 10.3.7]

$$C_l = 1,0.$$

А.9.21 Поправка на форму канала [2, п. 10.3.7]

$$C_k = 1,0.$$

А.9.22 Коэффициент теплоотдачи конвекцией от дымовых газов к стенке [2, п. 10.3.7]

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\Gamma}}{d_{\text{ВН}}} \cdot \left( \frac{w_{\Gamma} \cdot d_{\text{ВН}}}{v_{\Gamma}} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_k = \\ &= 0,023 \cdot \frac{5,45 \cdot 10^{-2}}{0,037} \cdot \left( \frac{10,18 \cdot 0,037}{54,1 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,643^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 33,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.9.23 Расчетная скорость воздуха

$$w_{\text{В}} = \frac{B_{\text{р}} \cdot \beta_{\text{Вп2}} \cdot V_0^{\text{H}} \cdot (t_{\text{В,ср}} + 273)}{f_{\text{В}} \cdot 273} = \frac{7,0 \cdot 1,06 \cdot 5,76 \cdot (291 + 273)}{21,8 \cdot 273} = 4,05 \text{ м/с}.$$

А.9.24 Коэффициент теплопроводности воздуха [2, разд. 10]

$$\lambda_{\text{В}} \cdot 10^2 = 4,42 \text{ Вт (м·К)}.$$

А.9.25 Коэффициент кинематической вязкости воздуха [2, разд. 10]

$$v_{\text{В}} \cdot 10^6 = 47,7 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.9.26 Критерий Прандтля для воздуха [2, разд. 10]

$$Pr_{\text{В}} = 0,69.$$

А.9.27 Поправка на число рядов в пучке по ходу воздуха [2, п. 10.3.4]

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

$$C_z = 1,0.$$

А.9.28 Поправка на компоновку пучка [2, п. 10.3.4]

$$C_s = 0,95 \cdot \varphi^{0,1} = 0,95 \cdot 1,92^{0,1} = 1,01.$$

А.9.29 Коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху [2, п. 10.3.4]

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0,36 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_B}{d} \cdot \left( \frac{w_B \cdot d}{v_B} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} = \\ &= 0,36 \cdot 1 \cdot 1,01 \cdot \frac{4,42 \cdot 10^{-2}}{0,04} \cdot \left( \frac{4,05 \cdot 0,04}{47,7 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,69^{0,33} = 46,71 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.9.30 Эффективная толщина излучающего слоя [2, п. 10.3.15]

$$s = 0,9 \cdot d_{\text{вн}} = 0,9 \cdot 0,037 = 0,033 \text{ м.}$$

А.9.31 Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания [2, п. 6.3.4]

$$\begin{aligned} k_r &= k_r^0 \cdot r_n = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_n \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{г.ср}}) \cdot r_n = \\ &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,09}{\sqrt{10 \cdot 0,1 \cdot 0,225 \cdot 0,033}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 647) \cdot 0,225 = 18,03 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})} \end{aligned}$$

А.9.32 Коэффициент  $A_{\text{зл}}$  для топлива [2, табл. 6.1]

$$A_{\text{зл}} = 0,8.$$

А.9.33 Коэффициент поглощения лучей частицами летучей золы

$$k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}} = \frac{10^4 \cdot A_{\text{зл}}}{\sqrt[3]{(T_{\text{г.ср}})^2}} \cdot \frac{\mu_{\text{зл}}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{\text{зл}} \cdot s} = \frac{10^4 \cdot 0,8}{\sqrt[3]{647^2}} \cdot \frac{0,015}{1 + 1,2 \cdot 0,015 \cdot 0,033} = 1,6 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}.$$

А.9.34 Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока при сжигании заданного топлива

$$kps = (k_r^0 \cdot r_n + k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}}) \cdot p \cdot s = (18,03 + 1,6) \cdot 0,1 \cdot 0,033 = 0,065.$$

А.9.35 Степень черноты потока газов, при средней температуре  $T_{\text{г.ср}}$  и давлении  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ,

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,065} = 0,063.$$

А.9.36 Степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающей поверхности [2, п. 10.3.12]

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		98

$$a_3 = 0,8.$$

А.9.37 Абсолютная температура загрязненной наружной поверхности труб воздухоподогревателя

$$T_3 = \frac{T_{г.ср} + T_{в.ср}}{2} = \frac{647 + 564}{2} = 605,5 \text{ К.}$$

А.9.38 Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания

$$\begin{aligned} \alpha_{л} &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{г.ср})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_3}{T_{г.ср}}\right)^4}{1 - \frac{T_3}{T_{г.ср}}} = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,063 \cdot (647)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{605,5}{647}\right)^4}{1 - \frac{605,5}{647}} = 3,16 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

А.9.39 Коэффициент А для заданного топлива [2, п. 10.3.16]

$$A = 0,4.$$

А.9.40 Коэффициент теплоотдачи, с учетом излучения газовых объемов в межтрубном пространстве,

$$\alpha'_{л} = \alpha_{л} \cdot \left[ 1 + A \cdot \left(\frac{T'_г}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{1_{об}}{1_{п}}\right)^{0,07} \right] = 3,16 \cdot \left[ 1 + 0,4 \cdot \left(\frac{689}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{3,4}{1,5}\right)^{0,07} \right] = 4,38 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.9.41 Коэффициент использования поверхности нагрева [2, п. 10.4.1]

$$\xi = 1,0.$$

А.9.42 Коэффициент теплоотдачи от газов к стенкам труб

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha'_{л}) = 1,0 \cdot (33,68 + 4,38) = 38,06 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

А.9.43 Коэффициент тепловой эффективности, учитывающий влияние загрязнения поверхности, неполноты омывания ее газами и воздухом, перетоков воздуха [2, п. 10.4.4],

$$\psi = 0,9.$$

А.9.44 Коэффициент теплопередачи [2, разд. 10]

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						99
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,9 \cdot 38,06}{1 + \frac{38,06}{46,71}} = 18,87 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

А.9.45 Разность температур на входе в ступень

$$\Delta t' = v'_r - t''_b = 416 - 350 = 66 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.9.46 Разность температур на выходе из ступени

$$\Delta t'' = v''_r - t'_b = 331 - 232 = 99 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.9.47 Температурный напор в ступени при прямотоке

$$\Delta t_{\text{прт}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{99 - 66}{\ln\left(\frac{99}{66}\right)} = 81,39 \text{ }^\circ\text{C}$$

А.9.48 Большой перепад температуры среды:

$$\tau_{\delta} = t_b'' - t_b' = 350 - 232 = 118 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.9.49 Меньший перепад температуры среды:

$$\tau_{\text{м}} = v'_r - v''_r = 416 - 331 = 85 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.9.50 Параметр

$$R = \frac{\tau_{\delta}}{\tau_{\text{м}}} = \frac{118}{85} = 1,39$$

А.9.51 Параметр

$$P = \frac{\tau_{\text{м}}}{v'_r - t'_b} = \frac{85}{416 - 232} = 0,46$$

А.9.52 Коэффициент пересчета противоточной схемы на более сложную [2, рис. 11.7]

$$\psi = 0,85.$$

А.9.53 Расчетный температурный напор в ступени

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{\text{прт}} = 0,85 \cdot 81,39 = 69,18 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.9.54 Тепло, передаваемое ступени по уравнению теплопередачи,

$$Q_{\text{т}} = \frac{K \cdot \Delta t \cdot H}{B_p} = \frac{18,87 \cdot 10^{-3} \cdot 69,18 \cdot 5216}{7} = 973 \text{ кДж/кг}.$$

А.9.55 Невязка теплового баланса ступени

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		100

$$|\Delta Q| = \frac{(Q_6 - Q_T) \cdot 100}{Q_6} = \frac{989 - 973}{989} \cdot 100 = 1,62\%$$

А.9.56 Допустимая абсолютная невязка теплового баланса – менее чем 2 %.

Уточнения расчета не требуется.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		101

## А.10 Тепловой расчёт экономайзера второй ступени

### А.10.1 Конструктивные характеристики экономайзера второй ступени (Эк2):

- Тип ступени – змеевиковая, шахматная, противоточная.
- Диаметр труб наружный  $d = 32$  мм.
- Диаметр труб внутренний  $d_{\text{вн}} = 24$  мм.
- Поперечный шаг труб  $S_1 = 75$  мм.
- Относительный поперечный шаг труб  $\sigma_1 = S_1/d = 2,34$ .
- Продольный шаг труб  $S_2 = 55$  мм.
- Относительный продольный шаг труб  $\sigma_2 = S_2/d = 1,72$ .
- Средний относительный диагональный шаг труб  $\sigma'_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} - \sigma_2^2} = 2,08$ .
- Коэффициент  $\phi = (\sigma_1 - 1)/(\sigma'_2 - 1) = 1,24$ .
- Сечение для прохода воды  $f_{\text{в}} = 0,108$  м<sup>2</sup>.
- Сечение для прохода газов  $F_{\text{г}} = 25,1$  м<sup>2</sup>.
- Поверхность нагрева  $H = 1140$  м<sup>2</sup>.
- Число рядов труб по ходу газов  $z_2 = 20$ .
- Глубина пакета  $l_{\text{п}} = 1,08$  м.
- Глубина газового объема  $l_{\text{об}} = 0,5$  м.

А.10.2 Температура газов на выходе из Эк2 принимается равной температуре газов на входе в Вп2:

$$t'_{\text{г}} = 416^{\circ}\text{C} \text{ (689 K)}.$$

А.10.3 Энтальпия газов на выходе из Эк2 принимается равной энтальпии газов на входе в Вп2:

$$I''_{\text{г}} = 4693 \text{ кДж/кг}.$$

А.10.4 Температура воды на входе в Эк2 принимается температуре воды на выходе из Эк1

$$t'_{\text{в}} = 246^{\circ}\text{C}.$$

А.10.5 Давление воды на входе в Эк2 принимается равным давлению воды на выходе из Эк1:

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		102

$$p'_B = 16,1 \text{ МПа.}$$

А.10.6 Энтальпия воды на входе, при  $t'_B$  и  $p'_B$  [2, табл. 5.8],

$$i'_B = 1067 \text{ кДж/кг.}$$

А.10.7 Температура воды на выходе из ЭК2 принимается предварительно с последующим уточнением:

$$t''_B = 292 \text{ }^\circ\text{C.}$$

А.10.8 Давление воды на выходе из ЭК2 принимается равным давлению перегретого пара, увеличенному на 10 %:

$$p''_B = 1,1 \cdot p_{\text{пе}} = 1,1 \cdot 14 = 15,4 \text{ МПа.}$$

А.10.9 Энтальпия воды на выходе, при  $t''_B$  и  $p''_B$  [2, табл. 5.8],

$$i''_B = 1295 \text{ кДж/кг.}$$

А.10.10 Средняя температура воды

$$t_{B,\text{ср}} = \frac{t'_B + t''_B}{2} = \frac{246 + 292}{2} = 269 \text{ }^\circ\text{C} (542 \text{ К}).$$

А.10.11 Среднее давление воды

$$p_{B,\text{ср}} = \frac{p'_B + p''_B}{2} = \frac{16,1 + 15,4}{2} = 15,75 \text{ МПа.}$$

А.10.12 Удельный объем воды, при  $t_{B,\text{ср}}$  и  $p_{B,\text{ср}}$  [2, табл. 5.8],

$$v_B \cdot 10^2 = 0,12771 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

А.10.13 Расход воды в ступени

$$D_{\text{ЭК2}} = D_{\text{пе}} + D_{\text{пр}} = 58,33 + 2,92 = 61,25 \text{ кг/с.}$$

А.10.14 Тепло, воспринимаемое водой по уравнению теплового баланса,

$$Q_{\text{б.ЭК2}} = \frac{D_{\text{ЭК2}}}{B_p} \cdot (i''_B - i'_B) = \frac{61,25}{7} \cdot (1295 - 1067) = 1995 \text{ кДж/кг.}$$

А.10.15 Энтальпия дымовых газов на входе в ступень

$$I'_T = I''_T + \frac{Q_{\text{б.ЭК2}}}{\phi} - \Delta\alpha_{\text{ЭК2}} \cdot I_{\text{опрс}} = 4693 + \frac{1995}{0,994} - 0,02 \cdot 229 = 6695 \text{ кДж/кг.}$$

А.10.16 Температура дымовых газов на входе в ЭК2 определяется по табл. 2 при  $I'_T$  в столбце «за Кпп1»:

$$\vartheta'_T = 588 \text{ }^\circ\text{C} (861 \text{ К}).$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		103

А.10.17 Средняя температура дымовых газов:

$$\vartheta_{г.ср} = \frac{\vartheta'_г + \vartheta''_г}{2} = \frac{588 + 416}{2} = 502^\circ\text{C} (775 \text{ K}).$$

А.10.18 Средняя скорость дымовых газов

$$w_г = \frac{B_p \cdot V_г^H \cdot (\vartheta_{г.ср} + 273)}{F_г \cdot 273} = \frac{7 \cdot 7,714 \cdot (502 + 273)}{25,1 \cdot 273} = 6,11 \text{ м/с}.$$

А.10.19 Средняя скорость воды

$$w_в = \frac{D_{Эк2} \cdot v_в}{f_в} = \frac{61,25 \cdot 0,12771 \cdot 10^{-2}}{0,108} = 0,72 \text{ м/с}.$$

А.10.20 Коэффициент теплопроводности газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$\lambda_г \cdot 10^2 = 6,56 \text{ Вт (м}\cdot\text{К)}.$$

А.10.21 Коэффициент кинематической вязкости газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$\nu_г \cdot 10^6 = 73,3 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.10.22 Критерий Прандтля для газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$\text{Pr}_г = 0,62.$$

А.10.23 Поправка на число рядов по ходу воздуха [2, п. 10.3.4]

$$C_z = 1,0.$$

А.10.24 Поправка на компоновку пучка [2, п. 10.3.4]

$$C_s = 0,95 \cdot \varphi^{0,1} = 0,95 \cdot 1,24^{0,1} = 0,97.$$

А.10.25 Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенкам труб экономайзера [2, п. 10.3.4]

$$\begin{aligned} \alpha_к &= 0,36 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_г}{d} \cdot \left( \frac{w_г \cdot d}{\nu_г} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}_г^{0,33} = \\ &= 0,36 \cdot 1 \cdot 0,97 \cdot \frac{6,56 \cdot 10^{-2}}{0,032} \cdot \left( \frac{6,11 \cdot 0,032}{73,3 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,62^{0,33} = 69,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.10.26 Эффективная толщина излучающего слоя [2, п. 10.3.15]

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		104

$$s = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left( \frac{4}{3,14} \cdot 2,34 \cdot 1,72 - 1 \right) = 0,119 \text{ м.}$$

А.10.27 Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания [2, п. 6.3.4]

$$k_r = k_r^0 \cdot r_n = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_n \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_{r,cp}) \cdot r_n =$$

$$= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,091}{\sqrt{10 \cdot 0,1 \cdot 0,228 \cdot 0,119}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 775) \cdot 0,228 = 8,88 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.10.28 Коэффициент  $A_{зл}$  для топлива [2, табл. 6.1]

$$A_{зл} = 0,8.$$

А.10.29 Коэффициент поглощения лучей частицами летучей золы

$$k_{зл} \cdot \mu_{зл} = \frac{10^4 \cdot A_{зл}}{\sqrt[3]{(T_{r,cp})^2}} \cdot \frac{\mu_{зл}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{зл} \cdot s} = \frac{10^4 \cdot 0,8}{\sqrt[3]{775^2}} \cdot \frac{0,015}{1 + 1,2 \cdot 0,015 \cdot 0,119} = 1,42 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.10.30 Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока при сжигании заданного топлива

$$kps = (k_r^0 \cdot r_n + k_{зл} \cdot \mu_{зл}) \cdot p \cdot s = (8,88 + 1,42) \cdot 0,1 \cdot 0,119 = 0,123.$$

А.10.31 Степень черноты потока газов, при средней температуре  $T_{r,cp}$  и давлении  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ,

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,123} = 0,116.$$

А.10.32 Степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающей поверхности [2, п. 10.3.12]

$$a_3 = 0,8.$$

А.10.33 Абсолютная температура загрязненной наружной поверхности труб экономайзера [2, п. 10.3.13]

$$t_3 = t_{в,cp} + 60 = 269 + 60 = 329 \text{ }^\circ\text{C} (602 \text{ К}).$$

А.10.34 Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		105

$$\alpha_{\text{л}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{\text{г.ср}})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_3}{T_{\text{г.ср}}}\right)^4}{1 - \frac{T_3}{T_{\text{г.ср}}}} =$$

$$= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,116 \cdot (775)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{602}{775}\right)^4}{1 - \frac{602}{775}} = 7,85 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.10.35 Коэффициент А для заданного топлива [2, п. 10.3.16]

$$A = 0,4.$$

А.10.36 Коэффициент теплоотдачи, с учетом излучения газовых объемов в межтрубном пространстве,

$$\alpha'_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \cdot \left[ 1 + A \cdot \left(\frac{T'_{\text{г}}}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{1_{\text{об}}}{1_{\text{п}}}\right)^{0,07} \right] = 7,85 \cdot \left[ 1 + 0,4 \cdot \left(\frac{861}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,5}{1,08}\right)^{0,07} \right] = 10,72 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.10.37 Коэффициент использования поверхности нагрева [2, п. 10.4.1]

$$\xi = 1,0.$$

А.10.38 Коэффициент теплоотдачи от газов к стенкам труб

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_{\text{к}} + \alpha'_{\text{л}}) = 1,0 \cdot (69,5 + 10,72) = 80,22 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

А.10.39 Коэффициент тепловой эффективности, учитывающий влияние загрязнения поверхности, неполноты омывания ее дымовыми газами [2, п. 10.4.4],

$$\psi = 0,68.$$

А.10.40 Коэффициент теплопередачи [2, разд. 10]

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,68 \cdot 80,22 = 54,55 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

А.10.41 Разность температур на входе в ступень

$$\Delta t' = v'_{\text{г}} - t''_{\text{в}} = 588 - 292 = 296 \text{ }^\circ\text{С}.$$

А.10.42 Разность температур на выходе из ступени

$$\Delta t'' = v''_{\text{г}} - t'_{\text{в}} = 416 - 246 = 170 \text{ }^\circ\text{С}.$$

А.10.43 Температурный напор в ступени при противотоке

$$\Delta t_{\text{прт}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{296 - 170}{\ln\left(\frac{296}{170}\right)} = 227,2^{\circ}\text{C}$$

А.10.44 Тепло, передаваемое ступени по уравнению теплопередачи,

$$Q_{\text{т}} = \frac{K \cdot \Delta t \cdot H}{B_{\text{п}}} = \frac{54,55 \cdot 10^{-3} \cdot 227,2 \cdot 1140}{7} = 2018 \text{ кДж/кг.}$$

А.10.45 Невязка теплового баланса ступени

$$|\Delta Q| = \frac{(Q_{\text{б}} - Q_{\text{т}}) \cdot 100}{Q_{\text{б}}} = \frac{1995 - 2018}{1995} \cdot 100 = 1,15\%$$

А.10.46 Допустимая абсолютная невязка теплового баланса – менее чем 2 %.

Уточнения расчета не требуется.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
						107
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## А.11 Тепловой расчет топки

### А.11.1. Конструктивные характеристики топки:

- Объем топки  $V_T = 1123 \text{ м}^3$ .
- Площадь сечения топки  $F_T = 79,8 \text{ м}^2$ .
- Полная поверхность стен топки  $F_{ст} = 745 \text{ м}^2$ .
- Поверхность выходного окна топки  $F_{вых} = 69,5 \text{ м}^2$ .
- Площадь потолка топки  $F_{пот} = 80 \text{ м}^2$ .
- Диаметр экранных труб  $d = 60 \text{ мм}$ .
- Шаг экранных труб  $S = 80 \text{ мм}$ .
- Диаметр потолочных труб  $d_{пе} = 42 \text{ мм}$ .
- Шаг потолочных труб  $S_{пе} = 90 \text{ мм}$ .
- Поверхность потолочного пароперегревателя  $F_{пе} = 80 \text{ м}^2$ .
- Расчетная высота топки  $H_T = 18,85 \text{ м}$ .
- Средняя высота расположения горелок  $h_T = 6,3 \text{ м}$ .

А.11.2. Температура горячего воздуха, подаваемого в топку, принимается равной температуре воздуха на выходе из Вп2:

$$t''_{гв} = 350 \text{ }^\circ\text{С}.$$

А.11.3. Энтальпия горячего воздуха принимается равной энтальпии воздуха на выходе из Вп2:

$$I''_{0 гв} = 2722 \text{ кДж/кг}.$$

А.11.4. Температура присасываемого в топку воздуха принимается равной температуре холодного воздуха:

$$t_{прс} = t''_{хв} = 30 \text{ }^\circ\text{С}.$$

А.11.5. Энтальпия холодного воздуха, присасываемого в топку (по табл. 2),

$$I_{0 прс} = I_{0 хв} = 229 \text{ кДж/кг}.$$

А.11.6. Отношение количества воздуха, подаваемого в топку из воздухоподогревателя, к теоретически необходимому, при отсутствии рециркуляции газов,

$$\beta'_T = \alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{пл} = 1,2 - 0,07 - 0,1 = 1,03.$$

А.11.7. Тепло, вносимое в топку горячим и холодным воздухом,

$$Q_B = \beta'_T \cdot I_{0 гв} + (\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{пл}) \cdot I_{0 прс} =$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		108

$$= 1,03 \cdot 2722 + (0,07 + 0,1) \cdot 229 = 2843 \text{ кДж/кг.}$$

А.11.8. Полезное тепловыделение в топке, при отсутствии форсуночного дутья ( $Q_{\phi} = 0$ ) и рециркуляции газов в топку ( $r = 0$ ),

$$Q_{\tau} = Q_p \cdot \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_{\phi} + Q_B + \sum r \cdot I_{r.отб} =$$

$$= 21900 \cdot \frac{100 - 0 - 1,0 - 0,02}{100 - 1,0} + 0 + 2843 + 0 = 24739 \text{ кДж / кг}$$

А.11.9. Теоретическая (адиабатическая) температура горения топлива (см. табл. 2, столбец для топки)

$$g_a = 1962 \text{ }^{\circ}\text{C} (T_a = 2235 \text{ K}).$$

А.11.10. Угловой коэффициент газоплотных экранов топки и выходного газового окна

$$x_3 = x_{\text{вых}} = 1.$$

А.11.11. Коэффициент, учитывающий снижение тепловосприятия топочных экранов (коэффициент загрязнения) [2, табл. 6.4],

$$\zeta_3 = 0,45.$$

А.11.12. Коэффициент тепловой эффективности экранов топки

$$\psi_3 = x_3 \cdot \zeta_3 = 1,0 \cdot 0,45 = 0,45.$$

А.11.13. Коэффициент тепловой эффективности радиационного пароперегревателя, расположенного на потолке топки,

$$\psi_{p.пе} = x_{p.пе} \cdot \zeta_{p.пе} = 1,0 \cdot 0,45 = 0,45,$$

где  $\zeta_{p.пе}$  – коэффициент, учитывающий тепловое сопротивление загрязнений; принимается таким же, как и для топочных экранов.

А.11.14. Коэффициент, учитывающий взаимный теплообмен между топкой и ширмами, размещенными в выходном окне топки [2, п. 6.4.10],

$$\beta = 0,6.$$

А.11.15. Коэффициент, учитывающий снижение тепловосприятия выходного окна топки при размещении за ним ширм,

$$\zeta_{\text{вых}} = \zeta_3 \cdot \beta = 0,45 \cdot 0,6 = 0,27.$$

А.11.16. Коэффициент тепловой эффективности выходного окна топки

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		109

$$\psi_{\text{ВЫХ}} = x_{\text{ВЫХ}} \cdot \zeta_{\text{ВЫХ}} = 1,0 \cdot 0,27 = 0,27.$$

А.11.17. Средний коэффициент тепловой эффективности стен топки

$$\psi_{\text{ср}} = \frac{\psi_{\text{э}} \cdot F_{\text{СТ}} + \psi_{\text{ВЫХ}} \cdot F_{\text{ВЫХ}}}{F_{\text{СТ}} + F_{\text{ВЫХ}}} = \frac{1,0 \cdot 745 + 0,27 \cdot 69,5}{745 + 69,5} = 0,435.$$

А.11.18. Средний относительный уровень расположения горелок в топке

$$x_{\text{Г}} = \frac{h_{\text{Г}}}{H_{\text{Г}}} = \frac{6,3}{18,85} = 0,334$$

А.11.19. Коэффициент  $M_0$  для топки [2, табл. 6.3]

$$M_0 = 0,46.$$

А.11.20. Параметр забалластированности топочных газов, при отсутствии рециркуляции газов в топку,

$$r_v = \frac{V_{\text{Г}}^{\text{H}}}{V_{\text{ON}_2}^{\text{H}} + V_{\text{RO}_2}^{\text{H}}} = \frac{7,481}{4,57 + 1,06} = 1,33$$

А.11.21. Параметр  $M$  для топки

$$M = M_0 \cdot (1 - 0,4 \cdot x_{\text{Г}}) \cdot \sqrt[3]{r_v} = 0,46 \cdot (1 - 0,4 \cdot 0,334) \cdot \sqrt[3]{1,33} = 0,438.$$

А.11.22. Эффективная толщина излучающего слоя продуктов сгорания в топочной камере

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_{\text{Г}}}{F_{\text{СТ}}} = 3,6 \cdot \frac{1123}{745} = 5,43 \text{ м.}$$

А.11.23. Температура газов на выходе из топки принимается предварительно (с последующим уточнением):

$$\vartheta''_{\text{Т}} = 1050 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (T''_{\text{Т}} = 1323\text{K}).$$

А.11.24. Энтальпия газов на выходе из топки, при принятой температуре (табл. 2),

$$I''_{\text{Т}} = 12359 \text{ кДж/кг.}$$

А.11.25. Средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания топлива

$$(Vc)_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{Т}} - I''_{\text{Т}}}{\vartheta_{\text{а}} - \vartheta''_{\text{Т}}} = \frac{24739 - 12359}{1962 - 1050} = 13,57 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

А.11.26. Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		110

$$k_r = k_r^0 \cdot r_n = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_n \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_T'') \cdot r_n =$$

$$= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,093}{\sqrt{10 \cdot 0,1 \cdot 0,235 \cdot 5,43}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 1323) \cdot 0,235 = 0,84 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.11.27. Коэффициент  $A_{зл}$  для топлива [2, табл. 6.1]

$$A_{зл} = 0,8.$$

А.11.28. Коэффициент поглощения лучей частицами летучей золы

$$k_{зл} \cdot \mu_{зл} = \frac{10^4 \cdot A_{зл}}{\sqrt[3]{(T_T'')^2}} \cdot \frac{\mu_{зл}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{зл} \cdot s} = \frac{10^4 \cdot 0,8}{\sqrt[3]{1323^2}} \cdot \frac{0,015}{1 + 1,2 \cdot 0,015 \cdot 5,43} = 0,91 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.11.29. Коэффициент поглощения лучей коксовыми частицами [2, табл. 6.2]

$$k_{\text{кокс}} \cdot \mu_{\text{кокс}} = 0,20 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.11.30. Коэффициент поглощения газовой среды

$$k = k_r + k_{зл} \cdot \mu_{зл} + k_{\text{кокс}} \cdot \mu_{\text{кокс}} = 0,84 + 0,91 + 0,2 = 1,95 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.11.31. Критерий Бугера, характеризующий поглощательную способность продуктов сгорания при  $p = 0,1$  МПа,

$$Bu = kps = 1,95 \cdot 0,1 \cdot 5,43 = 1,06.$$

А.11.32. Эффективное значение критерия Бугера

$$B\tilde{u} = 1,6 \cdot \ln \left( \frac{1,4 \cdot Bu^2 + Bu + 2}{1,4 \cdot Bu^2 - Bu + 2} \right) = 1,6 \cdot \ln \left( \frac{1,4 \cdot 1,06^2 + 1,06 + 2}{1,4 \cdot 1,06^2 - 1,06 + 2} \right) = 0,98.$$

А.11.33. Расчетная температура газов на выходе из топки

$$T_T'' = \frac{T_a}{1 + M \cdot B\tilde{u}^{0,5} \left[ \frac{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot \psi_{cp} \cdot F_{ст} \cdot T_a^3}{\phi \cdot B_p \cdot (Vc)_{cp}} \right]^{0,6}} - 273 =$$

$$= \frac{2235}{1 + 0,438 \cdot 0,98^{0,5} \cdot \left[ \frac{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,435 \cdot 745 \cdot 2235^3}{0,994 \cdot 7 \cdot 13,57} \right]^{0,6}} - 273 = 1049^\circ\text{C}$$

А.11.34. Полученная расчетом температура газов на выходе из топки  $\vartheta''_T$  не отличается от предварительно принятой на величину более чем 100 °С. Расчет уточнения не требует.

А.11.35. Энтальпия газов на выходе из топки, при расчетной температуре (по табл. 2),

$$I''_T = 12346 \text{ кДж/кг.}$$

А.11.36. Количество тепла, воспринимаемое в топке излучением,

$$Q_{л.т} = \varphi \cdot (Q_T - I''_T) = 0,994 \cdot (24739 - 12346) = 12319 \text{ кДж/кг.}$$

А.11.37. Коэффициент распределения тепловосприятия по высоте топки для потолка [2, табл. 6.5]

$$y_B = 1,0.$$

А.11.38. Удельная тепловая нагрузка потолка топки (радиационного потолочного пароперегревателя)

$$q_{p.пе} = y_B \cdot \frac{B_p \cdot Q_{л.т} \cdot \psi_{p.пе}}{F_{ст} \cdot \psi_{ср}} = 1 \cdot \frac{7 \cdot 12319 \cdot 0,45}{745 \cdot 0,435} = 119,74 \text{ кВт/м}^2.$$

А.11.39. Тепловосприятие потолочного пароперегревателя излучением из топки

$$Q_{p.пе} = q_{p.пе} \cdot \frac{F_{пот}}{B_p} = 119,74 \cdot \frac{80}{7} = 1368 \text{ кДж/кг.}$$

А.11.40. Коэффициент распределения тепловосприятия по высоте топки для выходного окна топки [2, табл. 6.5]

$$y_{вых} = 0,9.$$

А.11.41. Удельное тепловосприятие выходного окна топки

$$q_{л.вых} = y_{вых} \cdot \frac{B_p \cdot Q_{л.т} \cdot \psi_{вых}}{F_{ст} \cdot \psi_{ср}} = 0,9 \cdot \frac{7 \cdot 12319 \cdot 0,27}{745 \cdot 0,435} = 64,66 \text{ кВт/м}^2.$$

А.11.42. Тепловосприятие излучением поверхности нагрева (ширм пароперегревателя), расположенной в выходном окне топки,

$$Q_{вых} = q_{вых} \cdot \frac{F_{вых}}{B_p} = 64,66 \cdot \frac{69,5}{7} = 642 \text{ кДж/кг.}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		112

А.11.43. Расчетное тепловое напряжение топчного объема

$$q_v = \frac{B_p \cdot Q_p}{V_T} = \frac{7 \cdot 21900}{1123} = 136,5 \text{ кВт/м}^3.$$

А.11.44. Допускаемое тепловое напряжение топчного объема [2, табл. 5.5]

$$q_{v,\text{доп}} = 175 \text{ кВт/м}^3.$$

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		113

А.12 Расчет общего теплообмена в пароперегревателе и составление невязки теплового баланса котла

А.12.1. Пароперегреватель рассчитываемого котла состоит из радиационной части расположенной на потолке топки (Рпе), ширм на выходе из топки (Шпе) и трех конвективных ступеней (Кпе1, Кпе2 и Кпе3), размещенных в поворотном газоходе котла. Для регулирования температуры перегрева пара имеется два впрыскивающих пароохладителя, первый из которых расположен «в рассечке» ширм, второй – за Кпе3.

Схема пароперегревателя котла представлена на рис. 2.

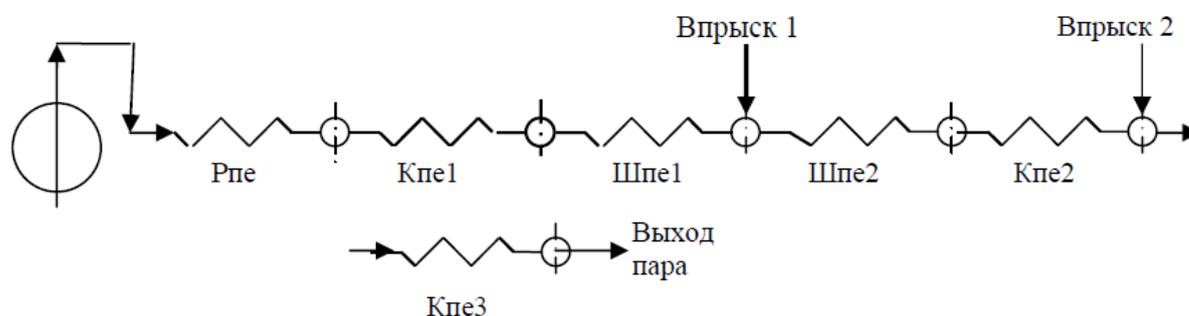


Рисунок 2 - Принципиальная схема пароперегревателя

А.12.2. Расход пара на выходе из пароперегревателя

$$D_{пе} = 58,33 \text{ кг/с.}$$

А.12.3. Давление перегретого пара на выходе из пароперегревателя

$$p_{пе} = 14 \text{ МПа.}$$

А.12.4. Температура пара на выходе из пароперегревателя

$$t''_{п} = t_{пе} = 545 \text{ }^{\circ}\text{C} .$$

А.12.5. Энтальпия пара на выходе из пароперегревателя

$$i_{пе} = 3447,6 \text{ кДж/кг.}$$

А.12.6. Общая величина впрыска в пароохладителе (принимается в пределах 6–8 %)

$$p_{впр} = 7 \text{ \%}.$$

А.12.7. Количество впрыскиваемой воды

$$D_{впр} = \frac{p_{впр}}{100} D_{пе} = \frac{7}{100} \cdot 58,33 = 4,08 \text{ кг / с}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		114

А.12.8. Расход пара в пароперегревателе

$$D'_{пе} = D_{пе} - D_{впр} = 58,33 - 4,08 = 54,25 \text{ кг/с.}$$

А.12.9. Давление насыщенного пара на входе в пароперегреватель принимается равным давлению пара на выходе, увеличенному на 10 %:

$$p'_{н.п} = 1,1 \cdot p_{пе} = 15,4 \text{ МПа.}$$

А.12.10. Температура насыщенного пара на входе в пароперегреватель при этом давлении

$$t'_{п} = t_s = 344,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

А.12.11. Энтальпия насыщенного пара на входе в пароперегреватель

$$i'_{п} = i''_s = 2600 \text{ кДж/кг.}$$

А.12.12. Энтальпия кипящей воды, впрыскиваемой в пароохладитель

$$i_{впр} = i'_s = 1625,9 \text{ кДж/кг.}$$

А.12.13. Количество тепла, воспринимаемое радиационным (потолочным) пароперегревателем излучением из топки, определено при расчете топки (п. А.11.39):

$$Q_{л.пе} = 1368 \text{ кДж/кг.}$$

А.12.14. Количество тепла, воспринимаемое ширмовым и конвективным пароперегревателем излучением из топки, определено при расчете топки (п. А.11.42):

$$Q_{л.пе} = Q_{л.вых} = 642 \text{ кДж/кг.}$$

А.12.15. Количество тепла, воспринимаемое паром конвекцией по уравнению теплового баланса,

$$\begin{aligned} Q_{б.пе} &= \frac{D_{пе} \cdot i_{пе} - [(D_{пе} - D_{впр}) \cdot i'_{п} + D_{впр} \cdot i_{впр}]}{B_p} - Q_{л.рпе} - Q_{л.пе} = \\ &= \frac{58,33 \cdot 3447,6 - [(58,33 - 4,08) \cdot 2600 + 4,08 \cdot 1625,9]}{7} - 1368 - 642 = 5621 \text{ кДж / кг} \end{aligned}$$

А.12.16. Температура газов на входе в пароперегреватель, которая равна температуре газов на выходе из топки (п. А.11.33),

$$\vartheta'_r = \vartheta''_T = 1049^{\circ}\text{C}.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		115

А.12.17. Энтальпия газов на входе в пароперегреватель, она равна энтальпии газов на выходе из топки (п. А.11.34),

$$I'_r = 12346 \text{ кДж/кг.}$$

А.12.18. Энтальпия присасываемого холодного воздуха, определяемая по табл. 2 при  $t_{хв} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$$I_{0 \text{ прс}} = I_{0 \text{ хв}} = 229 \text{ кДж/кг.}$$

А.12.19. Количество тепла, воспринимаемое паропроводящими трубами, находящимися в газоходе пароперегревателя за ширмами (принимается приблизительно равным разности энтальпий газов при температуре газов на выходе из топки и температуре газов, меньшей на  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ),

$$Q_{\text{п.отв}} = 129 \text{ кДж/кг.}$$

А.12.20. Энтальпия газов на выходе из пароперегревателя (из уравнения теплового баланса по газам)

$$\begin{aligned} I''_r &= I'_r - \frac{Q_{\text{б.пе}}}{\phi} - \frac{Q_{\text{п.отв}}}{\phi} + \sum \Delta\alpha_{\text{пе}} \cdot I_{0\text{прс}} = \\ &= 12346 - \frac{5621}{0,994} - \frac{129}{0,994} + 0,03 \cdot 229 = 6568 \text{ кДж / кг} \end{aligned}$$

А.12.21. Температура газов на выходе из пароперегревателя определяется по табл. 2 в столбце «за Кпел1»:

$$g''_{\text{г.пе}} = 577^\circ\text{C}$$

Значительное отличие  $g''_{\text{г.пе}} = 577^\circ\text{C}$  от  $g'_{\text{ЭК2}} = 588^\circ\text{C}$ , (более чем на  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ), полученное на данном этапе расчета, будет свидетельствовать о том, что общий тепловой баланс котла удовлетворительно не сводится и относительная величина его невязки может быть недопустимой.

Уменьшить полученную расчетом недопустимую разницу между температурами  $g''_{\text{г.пе}}$  и  $g'_{\text{ЭК2}}$  можно попытаться путем подбора (увеличения, уменьшения) величины впрыска воды в пароохладитель  $D_{\text{впр}}$  и последующих повторяющихся расчетов. Принципиально подбор величины впрыска воды в пароохладитель, при которой будет обеспечиваться допустимая разница между температурами  $g''_{\text{г.пе}}$  и  $g'_{\text{ЭК2}}$ , особых затруднений не вызывает. При этом, однако, нужно иметь в виду,

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		116

что она (величина впрыска) должна быть не очень большой (более 10–12 %) и не слишком малой (менее 2–3 %). Иначе, как в том, так и в другом случае, не будет должным образом обеспечиваться регулирование температуры перегрева пара.

А.12.22. Общая величина впрыска в пароохладителе

$$p_{\text{впр}} = 6 \%$$

А.12.23. Количество впрыскиваемой воды

$$D_{\text{впр}} = \frac{p_{\text{впр}}}{100} D_{\text{пе}} = \frac{6}{100} \cdot 58,33 = 3,5 \text{ кг / с}$$

А.12.24. Расход пара в пароперегревателе

$$D'_{\text{пе}} = D_{\text{пе}} - D_{\text{впр}} = 58,33 - 3,5 = 54,83 \text{ кг/с.}$$

А.12.25. Количество тепла, воспринимаемое паром конвекцией по уравнению теплового баланса,

$$Q_{\text{б.пе}} = \frac{D_{\text{пе}} \cdot i_{\text{пе}} - [(D_{\text{пе}} - D_{\text{впр}}) \cdot i'_{\text{п}} + D_{\text{впр}} \cdot i_{\text{впр}}]}{B_{\text{р}}} - Q_{\text{л.рпе}} - Q_{\text{л.пе}} =$$

$$= \frac{58,33 \cdot 3447,6 - [(58,33 - 3,5) \cdot 2600 + 3,5 \cdot 1625,9]}{7} - 1368 - 642 = 5540 \text{ кДж / кг}$$

А.12.26. Энтальпия газов на выходе из пароперегревателя (из уравнения теплового баланса по газам)

$$I''_{\text{г}} = I'_{\text{г}} - \frac{Q_{\text{б.пе}}}{\phi} - \frac{Q_{\text{п.отв}}}{\phi} + \sum \Delta\alpha_{\text{пе}} \cdot I_{\text{опрс}} =$$

$$= 12346 - \frac{5540}{0,994} - \frac{129}{0,994} + 0,03 \cdot 229 = 6650 \text{ кДж / кг}$$

А.12.27. Температура газов на выходе из пароперегревателя определяется по табл. 2 в столбце «за Кпел1»:

$$t''_{\text{г.пе}} = 584^{\circ}\text{C}$$

Она отличается от температуры газов на входе во вторую ступень экономайзера, полученной при расчете второй ступени экономайзера и равной 588 °С, всего лишь на 4. Это свидетельствует о хорошей сходимости теплового баланса всего котла, что и показывает нижеприводимая его невязка.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		117

А.12.28. Невязка теплового баланса всего котла. В общем виде она определяется по [3, формула (9-01)]. Для рассчитываемого котла

$$|\Delta Q| = Q_p \cdot \frac{\eta_k}{100} + Q_{\phi} + Q_{в.вн} - (Q_{л.т} + Q_{б.пе} + Q_{п.отв} + Q_{б.ЭК1} + Q_{б.ЭК2}) \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) =$$

$$= 21900 \cdot \frac{93,62}{100} + 0 + 0 - (12319 + 5540 + 129 + 638 + 1995) \cdot \left(1 - \frac{1}{100}\right) = 87,99 \text{ кДж / кг}$$

Относительно располагаемого тепла топлива

$$|\Delta q| = \frac{|\Delta Q|}{Q_p} \cdot 100 = \frac{87,99}{21900} \cdot 100 = 0,4\%$$

что вполне удовлетворительно, т. к. ее величина может быть допущена до 0,5 %.

Поскольку требования по невязке теплового баланса и температурам газов для данного расчета обеспечены, производится расчет теплопередачи во всех ступенях пароперегревателя.

Последовательность расчета ступеней пароперегревателя принята следующей: расчет радиационного пароперегревателя – расчет 1-й ступени – расчет 2-й ступени (крайних ширм) – расчет 2-й ступени (средних ширм) – расчет 3-й ступени – расчет 4-й ступени.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		118

### А.13 Расчет радиационного пароперегревателя

А.13.1. Радиационный пароперегреватель (Рпе) представляет собой плоскую трубную панель, расположенную на всем потолке котла, как над топкой, так и над пароперегревателем и опускным газоходом. На его вход поступает насыщенный пар из барабана котла. С его выхода пар направляется в первую ступень пароперегревателя (Кпе1).

А.13.2. Задачей поверочного расчета радиационного пароперегревателя является определение количества тепла, воспринимаемое им излучением из топки, и температуры пара на его выходе.

А.13.3. В качестве исходных данных при расчете используются поверхность потолка  $F_{р.пе}$ ,  $m^2$ , занимаемая радиационным пароперегревателем, и тепло, воспринимаемое им излучением из топки.

А.13.4. Тепло, воспринимаемое радиационным пароперегревателем излучением из топки, определено ранее, при расчете топки (п. 11.39):

$$Q_{л.рпе} = 1368 \text{ кДж/кг.}$$

А.13.5. Суммарный расход впрыскиваемой воды в пароохладителях определен ранее (п. 12.23):

$$D_{впр} = 3,5 \text{ кг/с.}$$

А.13.6. Расход пара в радиационном пароперегревателе

$$D_{рпе} = D_{пе} - D_{впр} = 58,33 - 3,5 = 54,83 \text{ кг/с.}$$

А.13.7. Температура пара на входе в радиационный пароперегреватель, принимаемая равной температуре насыщенного пара  $t''_s$  при давлении в барабане котла, определена ранее (п. 6.31):

$$t'_{рпе} = t''_s = 344,3 \text{ }^\circ\text{C.}$$

А.13.8. Энтальпия пара на входе в радиационный пароперегреватель, принимаемая равной энтальпии насыщенного пара  $i''_s$  при давлении в барабане котла, определена ранее (п. 6.32):

$$i'_п = i''_s = 2600 \text{ кДж/кг.}$$

А.13.9. Энтальпии пара на выходе из радиационного перегревателя

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		119

$$i''_{\text{рпе}} = i'_{\text{рпе}} + Q_{\text{л.рпе}} \cdot \frac{V_{\text{р}}}{D_{\text{рпе}}} = 2600 + 1368 \cdot \frac{7}{54,83} = 2775 \text{ кДж/кг.}$$

А.13.10. Температура пара на выходе из радиационного пароперегревателя определяется по энтальпии пара на выходе  $i''_{\text{рпе}}$  при давлении в барабане котла с помощью таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара [2, табл. 5.9]:

$$t''_{\text{рпе}} = 364 \text{ }^\circ\text{C.}$$

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
						120
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

#### А.14 Расчет первой по ходу пара ступени пароперегревателя

А.14.1. Первая ступень пароперегревателя выполнена в виде конвективного змеевикопучка труб. Расположена она в поворотном газоходе котла и является последней по ходу газов ступенью пароперегревателя.

А.14.2. При поверочном расчете данной ступени пароперегревателя решаются две задачи:

- 1) определение количества тепла, воспринимаемого им конвекцией от дымовых газов;
- 2) расчет температуры газов на его входе и температуры пара на выходе.

Расчет проводится исключительно при конструктивных заводских характеристиках, без каких-либо их изменений.

#### 14.3. Конструктивные характеристики первой ступени пароперегревателя:

- Тип ступени – коридорная, противоточная.
- Диаметр труб наружный  $d = 32$  мм.
- Диаметр труб внутренний  $d_{\text{вн}} = 24$  мм.
- Число рядов труб по ходу газов  $z_2 = 24$ .
- Поперечный шаг труб  $S_1 = 80$  мм.
- Относительный поперечный шаг труб  $\sigma_1 = S_1/d = 2,50$ .
- Продольный шаг труб  $S_2 = 66$  мм.
- Относительный продольный шаг труб  $\sigma_2 = S_2/d = 2,06$ .
- Сечение для прохода пара  $f_{\text{п}} = 0,0525$  м<sup>2</sup>.
- Сечение для прохода газов  $F_{\text{г}} = 15$  м<sup>2</sup>.
- Поверхность нагрева  $H = 1046$  м<sup>2</sup>.
- Глубина пакета  $l_{\text{п}} = 3,7$  м.
- Глубина газового объема  $l_{\text{об}} = 0,5$  м.

А.14.4. Температура газов на выходе из ступени принимается равной температуре газов на выходе из пароперегревателя, определенной ранее при общем расчете пароперегревателя (п. 12.27):

$$\vartheta''_{\text{г}} = 584^{\circ}\text{C} \quad (T''_{\text{г}} = 857 \text{ K}).$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		121

А.14.5. Энтальпия газов на выходе из ступени принимается равной энтальпии газов на выходе из пароперегревателя, определенной ранее при общем расчете пароперегревателя (п. 12.26):

$$I''_r = 6650 \text{ кДж/кг.}$$

А.14.6. Температура газов на входе в ступень принимается предварительно, с последующим уточнением:

$$g'_r = 800^\circ\text{C} \quad (T'_r = 1073 \text{ К}).$$

А.14.7. Энтальпия газов на входе в ступень

$$I'_r = 9254 \text{ кДж/кг.}$$

А.14.8. Энтальпия присасываемого в ступень холодного воздуха при  $t_{хв} = 30^\circ\text{C}$

$$I_{\text{прс}} = I_{0\text{хв}} = 229 \text{ кДж/кг.}$$

А.14.9. Тепло, отдаваемое дымовыми газами по уравнению теплового баланса

$$Q_{б.г} = \phi \cdot (I'_r - I''_r + \Delta\alpha_{\text{КПЕ1}} \cdot I_{\text{прс}}) = 0,994 \cdot (9254 - 6650 + 0,015 \cdot 229) = 2592 \text{ кДж / кг.}$$

А.14.10. Расход пара в ступени

$$D = D_{\text{пе}} - D_{\text{впр}} = 58,33 - 3,5 = 54,83 \text{ кг/с.}$$

А.14.11. Давление пара на входе в ступень:

$$p' = 1,1 \cdot p_{\text{пе}} = 15,4 \text{ МПа.}$$

А.14.12. Температура пара на входе в ступень принимается равной температуре пара на выходе из радиационного пароперегревателя (п. 13.10):

$$t' = t''_{\text{пе}} = 364^\circ\text{C.}$$

А.14.13. Энтальпия пара на входе в ступень принимается равной энтальпии пара на выходе из радиационного пароперегревателя (п. 13.9):

$$i' = i''_{\text{пе}} = 2775 \text{ кДж / кг.}$$

А.14.14. Тепло, воспринимаемое ступенью излучением из топки, для данной ступени оно очень мало и не учитывается, т. е.

$$Q_{\text{л}} = 0.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		122

А.14.15. Энтальпия пара на выходе из ступени подсчитывается из уравнения теплового баланса ступени по пару  $Q_{б.п} = \frac{D}{B_p}(i''_{кнп1} - i'_{кнп1}) - Q_{л}$ , исходя из того, что

$$Q_{б.г} = Q_{б.п.}$$

$$i'' = i' + \frac{B_p \cdot (Q_{б.г} + Q_{л})}{D} = 2775 + \frac{7 \cdot (2592 + 0)}{54,83} = 3106 \text{ кДж / кг.}$$

А.14.16. Давление перегретого пара на выходе из ступени

$$p'' = p' - \Delta p = 15,4 - (15,4 - 14,0)/5 = 15,12 \text{ МПа.}$$

Здесь 5 – число ступеней пароперегревателя.

14.17. Среднее давление перегретого пара в ступени

$$\frac{p' + p''}{2} = \frac{15,4 + 15,12}{2} = 15,26 \text{ МПа.}$$

А.14.18. Температура пара на выходе из ступени определена по значению  $i''$  при давлении  $p''$ :

$$t'' = 435 \text{ }^\circ\text{C.}$$

А.14.19. Тепло, воспринимаемое паром по уравнению теплового баланса (для контроля),

$$Q_{б.п} = \frac{D}{B_p}(i'' - i') - Q_{л} = \frac{54,83}{7}(3106 - 2775) - 0 = 2592 \text{ кДж / кг}$$

А.14.20. Средняя температура пара в ступени

$$t_{cp} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{364 + 435}{2} = 399,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

А.14.21. Средняя температура дымовых газов в ступени

$$\vartheta_{г.ср} = \frac{\vartheta'_г + \vartheta''_г}{2} = \frac{800 + 584}{2} = 692 \text{ }^\circ\text{C} \quad (T_{г.ср} = 965 \text{ К})$$

А.14.22. Средняя скорость дымовых газов

$$\omega_r = \frac{B_p \cdot V_r^H \cdot (\vartheta_{г.ср} + 273)}{F_r \cdot 273} = \frac{7 \cdot 7,615 \cdot (692 + 273)}{15 \cdot 273} = 12,56 \text{ м/с.}$$

А.14.23. Коэффициент теплопроводности газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

						<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
							123
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

$$\lambda_r \cdot 10^2 = 8,18 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

А.14.24. Коэффициент кинематической вязкости газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$v_r \cdot 10^6 = 105,6 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.14.25. Критерий Прандтля для газов, с учетом поправки на его состав [2, разд. 10],

$$\text{Pr}_r = 0,601.$$

А.14.26. Поправка на геометрическую компоновку пучка подсчитывается по формуле [2, п. 10.3.5]

$$C_s = \left[ 1 + (2\sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2},$$

но при  $\sigma_2 \geq 2$  и при  $\sigma_1 \leq 1,5$  принимается, что  $C_s = 1$ .

А.14.27. Поправка на число рядов труб по ходу газов для коридорного пучка подсчитывается по формуле [2, п. 10.3.5]

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (z_2 - 2), \text{ но при } z_2 \geq 10 \text{ } C_z = 1.$$

А.14.28. Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенке для коридорного пучка [2, п. 10.3.5]

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,2 \cdot C_s \cdot C_z \cdot \frac{\lambda_r}{d} \left( \frac{\omega_r \cdot d}{v_r} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}_r^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{8,18 \cdot 10^{-2}}{0,032} \left( \frac{12,56 \cdot 0,032}{105,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,601^{0,33} = 91,83 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.14.29. Средний удельный объем пара [2, табл. 5.9]

$$v_{\text{п}} = 0,015262 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

А.14.30. Расчетная скорость пара

$$\omega_{\text{п}} = \frac{D \cdot v_{\text{п}}}{f_{\text{п}}} = \frac{54,83 \cdot 0,015262}{0,0525} = 15,94 \text{ м/с}$$

А.14.31. Коэффициент теплопроводности пара [2, разд. 10]

$$\lambda_{\text{п}} \cdot 10^2 = 8,09 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

А.14.32. Коэффициент кинематической вязкости пара [2, разд. 10]

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		124

$$v_{\pi} \cdot 10^6 = 0,381 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.14.33. Критерий Прандтля для пара [2, разд. 10]

$$\text{Pr}_{\pi} = 1,317.$$

А.14.34. Поправка на температуру потока пара [2, разд. 10]

$$C_t = 1,0.$$

А.14.35. Поправка на длину канала [2, разд. 10]

$$C_l = 1,0.$$

А.14.36. Поправка на форму канала [2, разд. 10]

$$C_k = 1,0.$$

А.14.37. Коэффициент теплоотдачи от стенки к пару [2, п. 10.3.7]

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\pi}}{d_{\text{вн}}} \left( \frac{\omega_{\pi} \cdot d_{\text{вн}}}{v} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\pi}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_k = \\ &= 0,023 \cdot \frac{8,09 \cdot 10^{-2}}{0,024} \left( \frac{15,94 \cdot 0,024}{0,381 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,317^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 5479 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.14.38. Относительный поперечный шаг труб  $\sigma_1 = 2,50$ .

А.14.39. Относительный продольный шаг труб  $\sigma_2 = 2,06$ .

А.14.40. Эффективная толщина излучающего слоя [2, п. 10.3.15]

$$s = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left( \frac{4}{3,14} \cdot 2,5 \cdot 2,06 - 1 \right) = 0,16 \text{ м}$$

А.14.41. Давление газов в газоходе пароперегревателя

$$p = 0,1 \text{ МПа}.$$

А.14.42. Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания

$$\begin{aligned} k_r &= k_r^0 \cdot r_{\pi} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_{\pi} \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{г.ср}}) \cdot r_{\pi} = \\ &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,092}{\sqrt{10 \cdot 0,1 \cdot 0,231 \cdot 0,16}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 965) \cdot 0,231 = 6,91 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})} \end{aligned}$$

А.14.43. Коэффициент  $A_{\text{зл}}$  для топлива [2, табл. 6.1]

$$A_{\text{зл}} = 0,8.$$

А.14.44. Коэффициент поглощения лучей частицами летучей золы

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		125

$$k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}} = \frac{10^4 \cdot A_{\text{зл}}}{\sqrt[3]{(T_{\text{г.ср}})^2}} \cdot \frac{\mu_{\text{зл}}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{\text{зл}} \cdot s} = \frac{10^4 \cdot 0,8}{\sqrt[3]{965^2}} \cdot \frac{0,015}{1 + 1,2 \cdot 0,015 \cdot 0,16} = 1,23 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.14.45. Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока при сжигании заданного топлива

$$kps = (k_{\text{г}}^0 \cdot r_{\text{н}} + k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}}) \cdot p \cdot s = (6,91 + 1,23) \cdot 0,1 \cdot 0,16 = 0,13.$$

А.14.46. Степень черноты потока газов, при средней температуре  $T_{\text{г.ср}}$  и давлении  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ,

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,13} = 0,122.$$

А.14.47. Степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающей поверхности [2, п. 10.3.12]

$$a_3 = 0,8.$$

А.14.48. Коэффициент тепловой эффективности, учитывающий влияние загрязнения поверхности и неполноты омывания ее газами [2, п. 10.4.4]

$$\psi = 0,59.$$

А.14.49. Предварительно принимаемое значение абсолютной температуры загрязненной наружной поверхности труб

$$T_{\text{з.пр}} = 780 \text{ К}.$$

А.14.50. Предварительное значение коэффициента теплоотдачи излучением продуктов сгорания

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{л.пр}} &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{\text{г.ср}})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_{\text{з.пр}}}{T_{\text{г.ср}}}\right)^4}{1 - \frac{T_{\text{з.пр}}}{T_{\text{г.ср}}}} = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,122 \cdot (965)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{780}{965}\right)^4}{1 - \frac{780}{965}} = 16,73 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

А.14.51. Коэффициент использования поверхности [2, п. 10.4.1]

$$\xi = 1,0.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						126
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

А.14.52. Предварительное значение коэффициента теплоотдачи от газов к стенке

$$\alpha_{1,пр} = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_{л,пр}) = 1,0 \cdot (91,83 + 16,73) = 108,56 \text{ Вт (м}^2 \cdot \text{К)}.$$

А.14.53. Расчетное значение абсолютной температуры загрязненной наружной поверхности труб

$$\begin{aligned} T_3 &= t_{cp} + \left[ \frac{1}{\psi} \left( \frac{1}{\alpha_{1пр}} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \frac{1}{\alpha_{1пр}} \right] \cdot \frac{B_p}{H} \cdot (Q_6 + Q_{л}) \cdot 10^3 + 273 = \\ &= 399,5 + \left[ \frac{1}{0,59} \left( \frac{1}{108,56} + \frac{1}{5479} \right) - \frac{1}{108,56} \right] \cdot \frac{7}{1046} \cdot (2592 + 0) \cdot 10^3 + 273 = 789\text{К} \end{aligned}$$

Полученное расчетное значение абсолютной температуры загрязненной наружной поверхности труб пароперегревателя мало отличается от предварительно принятого и уточнения не требует.

А.14.54. Расчетный коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания

$$\begin{aligned} \alpha_{л} &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{г,ср})^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_3}{T_{г,ср}} \right)^4}{1 - \frac{T_3}{T_{г,ср}}} = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,122 \cdot (965)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{789}{965} \right)^4}{1 - \frac{789}{965}} = 16,97 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)} \end{aligned}$$

А.14.55. Коэффициент А для заданного топлива [2, п. 10.3.16]

$$A = 0,4.$$

А.14.56. Коэффициент теплоотдачи, с учетом излучения газовых объемов в межтрубном пространстве,

$$\alpha'_{л} = \alpha_{л} \cdot \left[ 1 + A \cdot \left( \frac{T'_r}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{1_{об}}{1_{п}} \right)^{0,07} \right] = 16,97 \cdot \left[ 1 + 0,4 \cdot \left( \frac{1073}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{0,5}{3,7} \right)^{0,07} \right] = 22,98 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)}$$

А.14.57. Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке [2, п. 10.3.2]

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha'_{л}) = 1,0 \cdot (91,83 + 22,98) = 114,81 \text{ Вт (м}^2 \cdot \text{К)}.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		127

А.14.58. Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,59 \cdot 114,81}{1 + \frac{114,81}{5479}} = 66,35$$

А.14.59. Разность температур на входе в ступень

$$\Delta t' = g'_{r'} - t' = 800 - 364 = 436 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.14.60. Разность температур на выходе из ступени

$$\Delta t'' = g''_{r''} - t'' = 584 - 435 = 149 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.14.61. Температурный напор в ступени при противотоке

$$\Delta t_{\text{прт}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{436 - 149}{\ln\left(\frac{436}{149}\right)} = 267,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

А.14.62. Тепло, передаваемое ступени по уравнению теплопередачи,

$$Q_{\text{т}} = \frac{K \cdot \Delta t_{\text{прт}} \cdot H}{B_{\text{р}}} = \frac{66,35 \cdot 10^{-3} \cdot 267,3 \cdot 1046}{7} = 2640 \text{ кДж/кг}.$$

А.14.63. Невязка теплового баланса ступени

$$|\Delta Q| = \frac{(Q_{\text{б}} - Q_{\text{т}}) \cdot 100}{Q_{\text{б}}} = \frac{2592 - 2640}{2592} \cdot 100 = 1,85\%$$

Она невелика, что свидетельствует о достаточно высокой точности проведенного расчета. Допускаемая величина невязки теплового баланса ступени – менее чем 2 %.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		128

## А.15 Расчет второй по ходу пара ширмовой ступени пароперегревателя

А.15.1. Вторая ступень пароперегревателя выполнена в виде ширм. Они расположены непосредственно в выходном газовом окне топки котла и являются первой по ходу газов ступенью пароперегревателя.

По ходу движения пара все ширмы разделены на две части (крайние и средние) по 8 ширм в каждой. Пар из первой ступени пароперегревателя поступает вначале в крайние ширмы, на выходе из которых установлен впрыскивающий пароохладитель первой ступени. После пароохладителя пар проходит по средним ширмам и направляется в конвективный пароперегреватель третьей ступени.

А.15.2. Задачи поверочного расчета данной ступени пароперегревателя:

1) определение количества тепла, воспринимаемого им конвекцией от дымовых газов;

2) расчет температуры газов на его входе и температуры пара на выходе.

А.15.3. Конструктивные характеристики второй (ширмовой) ступени пароперегревателя. Они одинаковые для крайних и средних ширм:

- Общее количество ширм  $n = 16$ .
- Диаметр труб наружный  $d = 32$  мм.
- Диаметр труб внутренний  $d_{\text{вн}} = 22$  мм.
- Число труб в ширмах по ходу газов  $z_2 = 16$ .
- Поперечный шаг труб  $S_1 = 585$  мм.
- Относительный поперечный шаг труб  $\sigma_1 = S_1/d = 18,28$ .
- Продольный шаг труб  $S_2 = 38$  мм.
- Относительный продольный шаг труб  $\sigma_2 = S_2/d = 1,19$ .
- Сечение для прохода пара  $f_{\text{п}} = 0,0608$  м<sup>2</sup>.
- Сечение для прохода газов  $F_{\text{г}} = 35,5$  м<sup>2</sup>.
- Теплообменная поверхность нагрева средних ширм  $H_{\text{ср.ш}} = 176$  м<sup>2</sup>.
- Теплообменная поверхность нагрева крайних ширм  $H_{\text{кр.ш}} = 176$  м<sup>2</sup>.
- Площадь выходного окна топки (весь газоход)  $F_{\text{вых}} = 69,5$  м<sup>2</sup>.
- Высота ширм  $A = 7,5$  м.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		129

- Глубина ширм  $l = 1,59$  м.

#### Расчет крайних ширм

А.15.4. Расход пара в крайних ширмах

$$D = D_{\text{пе}} - D_{\text{впр}} = 58,33 - 3,5 = 54,83 \text{ кг/с.}$$

А.15.5. Температура газов на входе принимается равной температуре газов на выходе из топки, определенной ранее, при расчете топки:

$$g'_{\text{г}} = 1049 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (} T'_{\text{г}} = 1322 \text{ К).}$$

А.15.6. Энтальпия газов на входе принимается равной энтальпии газов на выходе из топки, определенной ранее, при расчете топки:

$$I'_{\text{г}} = 12346 \text{ кДж/кг.}$$

А.15.7. Температура пара на входе в ступень принимается равной температуре пара на выходе из первой ступени пароперегревателя, рассчитанной ранее:

$$t' = 435 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

А.15.8. Давление пара на входе принимается равным давлению пара на выходе из первой ступени пароперегревателя, рассчитанной ранее:

$$p' = 15,12 \text{ МПа.}$$

А.15.9. Энтальпия пара на входе принимается равной энтальпии пара на выходе из первой ступени пароперегревателя, рассчитанной ранее:

$$i' = 3106 \text{ кДж/кг.}$$

А.15.10. Температура газов на выходе (принимается предварительно с последующим уточнением)

$$g''_{\text{г}} = 909 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (} T''_{\text{г}} = 1182 \text{ К).}$$

А.15.11. Средняя температура дымовых газов в ступени

$$g_{\text{г.ср}} = \frac{g' + g''}{2} = \frac{1049 + 909}{2} = 979 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (} 1252 \text{ К)}$$

А.15.12. Энтальпия газов на выходе (определяется по табл. 2.2)

$$I''_{\text{г}} = 10541 \text{ кДж/кг}$$

А.15.13. Энтальпия присасываемого в ступень холодного воздуха при  $t_{\text{хв}} = 30$   $^{\circ}\text{C}$

$$I_{\text{опрс}} = I_{\text{охв}} = 229 \text{ кДж/кг.}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						130
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

А.15.14. Тепло, отдаваемое дымовыми газами по уравнению теплового баланса,

$$Q_{б.г} = \phi \cdot (I' - I'' + \Delta\alpha_{III} \cdot I_{0прс}) / 2 = 0,994 \cdot (12346 - 10541 + 0,0 \cdot 229) / 2 = 897 \text{ кДж / кг}$$

А.15.15. Удельное тепловосприятие выходного окна топки (п. 11.41)

$$q_{л.вых} = 64,66 \text{ кВт/м}^2.$$

А.15.16. Эффективная толщина излучающего слоя

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{A} + \frac{1}{S_1} + \frac{1}{1}} = \frac{1,8}{\frac{1}{7,5} + \frac{1}{585} + \frac{1}{1,59}} = 0,728 \text{ м}$$

А.15.17. Давление газов в газоходе пароперегревателя

$$p = 0,1 \text{ МПа.}$$

А.15.18. Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания

$$k_r = k_r^0 \cdot r_n = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_n \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_{г.ср}) \cdot r_n =$$

$$= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,093}{\sqrt{10 \cdot 0,1 \cdot 0,235 \cdot 0,728}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 1252) \cdot 0,235 = 2,64 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.15.19. Коэффициент  $A_{зл}$  для топлива [2, табл. 6.1]

$$A_{зл} = 0,8.$$

А.15.20. Коэффициент поглощения лучей частицами золы

$$k_{зл} \cdot \mu_{зл} = \frac{10^4 \cdot A_{зл}}{\sqrt[3]{(T_{г.ср})^2}} \cdot \frac{\mu_{зл}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{зл} \cdot s} = \frac{10^4 \cdot 0,8}{\sqrt[3]{1252^2}} \cdot \frac{0,015}{1 + 1,2 \cdot 0,015 \cdot 0,728} = 1,02 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.15.21. Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока при сжигании заданного топлива

$$kps = (k_r^0 \cdot r_n + k_{зл} \cdot \mu_{зл}) \cdot p \cdot s = (2,64 + 1,02) \cdot 0,1 \cdot 0,728 = 0,266.$$

А.15.22. Степень черноты потока газов при средней температуре  $T_{г.ср}$  и давлении  $p = 0,1$  МПа

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,266} = 0,234.$$

А.15.23. Сумма угловых коэффициентов [2, табл. 8.1]

$$\Sigma x_p = 0,678.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						131
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

А.15.24. Тепло, воспринимаемое ступенью излучением из топки,

$$Q_{\text{л}} = \frac{q_{\text{л.вых}} \cdot \frac{F_{\text{вых}}}{2} \cdot \sum x_p \cdot (1-a)}{V_p} = \frac{64,66 \cdot \frac{69,5}{2} \cdot 0,678 \cdot (1-0,234)}{7} = 166,7 \text{кДж / кг}$$

А.15.25. Тепло излучения из топки, проходящее сквозь ширмы на третью ступень пароперегревателя,

$$Q_{\text{л}} = \frac{q_{\text{л.вых}} \cdot \frac{F_{\text{вых}}}{2} \cdot [1 - \sum x_p \cdot (1-a)]}{V_p} = \frac{64,66 \cdot \frac{69,5}{2} \cdot [1 - 0,678 \cdot (1-0,234)]}{7} = 154,3 \text{кДж / кг}$$

А.15.26. Энтальпия пара на выходе из крайних ширм подсчитывается из уравнения теплового баланса ступени по пару  $Q_{\text{б.п}} = \frac{D}{V_p} (i'' - i') - Q_{\text{л}}$ , исходя из того,

что  $Q_{\text{б.г}} = Q_{\text{б.п}}$ :

$$i'' = i' + \frac{V_p \cdot (Q_{\text{б.г}} + Q_{\text{л}})}{D} = 3106 + \frac{7 \cdot (897 + 166,7)}{54,83} = 3242 \text{кДж / кг}$$

А.15.27. Потеря давления в ширмах

$$\Delta p_{\text{ш}} = 0,1 \frac{p_{\text{не}}}{5} = 0,1 \frac{14}{5} = 0,28 \text{МПа}$$

А.15.28. Давление перегретого пара на выходе из ступени

$$p'' = p' - \Delta p_{\text{ш}} = 15,12 - 0,28 = 14,84 \text{МПа.}$$

А.15.29. Среднее давление перегретого пара в ступени

$$p_{\text{ср}} = \frac{p' + p''}{2} = \frac{15,12 + 14,84}{2} = 14,98 \text{МПа.}$$

А.15.30. Температура пара на выходе из ступени по значению  $i''$  при давлении  $p''$  [2, табл. 5.9],

$$t'' = 475 \text{°C.}$$

А.15.31. Тепло, воспринимаемое паром по уравнению теплового баланса (для контроля),

$$Q_{\text{б.п}} = \frac{D}{V_p} (i'' - i') - Q_{\text{л}} = \frac{54,83}{7} (3242 - 3106) - 166,7 = 897 \text{кДж / кг}$$

А.15.32. Средняя температура пара в ступени

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						133
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$t_{cp} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{435 + 475}{2} = 455^{\circ}\text{C}$$

А.15.33. Средняя скорость дымовых газов

$$\omega_r = \frac{V_p \cdot V_r^H \cdot (\vartheta_{r,cp} + 273)}{F_r \cdot 273} = \frac{7 \cdot 7,481 \cdot (979 + 273)}{35,5 \cdot 273} = 6,77 \text{ м/с.}$$

А.15.34. Коэффициент теплопроводности газов, с учетом поправки на их состав [2, 10],

$$\lambda_r \cdot 10^2 = 10,69 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

А.15.35. Коэффициент кинематической вязкости газов, с учетом поправки на их состав [2, разд. 10],

$$v_r \cdot 10^6 = 162,6 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.15.36. Критерий Прандтля для газов, с учетом поправки на их состав [2, разд. 10],

$$Pr_r = 0,58.$$

А.15.37. Поправка на геометрическую компоновку пучка [2, п. 10.3.5]

$$C_s = \left[ 1 + (2\sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[ 1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,19}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,69,$$

где принято, что  $\sigma_1 = 3$ , поскольку  $\sigma_1 > 3$ .

А.15.38. Поправка на число рядов труб по ходу газов для коридорного пучка [2, п. 10.3.5]

$$C_z = 1.$$

А.15.39. Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенке

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,2 \cdot C_s \cdot C_z \cdot \frac{\lambda_r}{d} \left( \frac{\omega_r \cdot d}{v_r} \right)^{0,65} \cdot Pr_r^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 0,69 \cdot 1 \cdot \frac{10,69 \cdot 10^{-2}}{0,032} \left( \frac{6,77 \cdot 0,032}{162,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,58^{0,33} = 41,37 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.15.40. Средний удельный объем пара [2, табл. 5.9]

$$v_{п} = 0,018759 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

А.15.41. Расчетная скорость пара

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						134
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\omega_{\text{п}} = \frac{D \cdot v_{\text{п}}}{f_{\text{п}}} = \frac{54,83 \cdot 0,018759}{0,0608} = 16,92 \text{ м/с}$$

А.15.42. Коэффициент теплопроводности пара [2, разд. 10]

$$\lambda_{\text{п}} \cdot 10^2 = 7,86 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

А.15.43. Коэффициент кинематической вязкости пара [2, разд. 10]

$$v_{\text{п}} \cdot 10^6 = 0,513 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.15.44. Критерий Прандтля для пара [2, разд. 10]

$$\text{Pr}_{\text{п}} = 1,118.$$

А.15.45. Поправка на температуру потока пара [2, разд. 10]

$$C_t = 1,0.$$

А.15.46. Поправка на длину канала [2, разд. 10]

$$C_l = 1,0.$$

А.15.47. Поправка на форму канала [2, разд. 10]

$$C_k = 1,0.$$

А.15.48. Коэффициент теплоотдачи от стенки к пару [2, п. 10.3.7]

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\text{п}}}{d_{\text{вн}}} \left( \frac{\omega_{\text{п}} \cdot d_{\text{вн}}}{v} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{п}}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_k = \\ &= 0,023 \cdot \frac{7,86 \cdot 10^{-2}}{0,022} \left( \frac{16,92 \cdot 0,022}{0,513 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,118^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 4194 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.15.49. Степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающей поверхности [2, п. 10.3.12]

$$a_3 = 0,8.$$

А.15.50. Коэффициент загрязнения поверхности [2, п. 10.4.2]

$$\varepsilon = 0,005.$$

А.15.51. Абсолютная температура загрязненной наружной поверхности труб

$$\begin{aligned} T_3 &= t_{\text{ср}} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{B_p}{H} \cdot (Q_6 + Q_{\text{п}}) \cdot 10^3 + 273 = \\ &= 455 + \left( 0,005 + \frac{1}{4194} \right) \cdot \frac{7}{176} \cdot (897 + 166,7) \cdot 10^3 + 273 = 950 \text{ К} \end{aligned}$$

А.15.52. Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
						135
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		



$$|\Delta Q| = \frac{(Q_6 - Q_7) \cdot 100}{Q_6} = \frac{897 - 881}{897} \cdot 100 = 1,78\%$$

Она невелика, что свидетельствует о достаточно высокой точности проведенного расчета. Допускаемая величина невязки теплового баланса ступени – менее чем 2 %.

#### Расчет пароохладителя первой ступени

А.15.61. Пароохладитель первой ступени впрыскивающий. Он расположен в промежутке между крайними и средними ширмами. Задачей его расчета является определение изменения (снижения) температуры пара за счет испарения впрыскиваемой воды.

А.15.62. Температура пара на входе в пароохладитель, равная температуре пара на выходе из крайних ширм (п. 15.30),

$$t'_{\text{По1}} = t''_{\text{кр.ш}} = 475 \text{ }^\circ\text{C} .$$

А.15.63. Энтальпия пара на входе в пароохладитель, равная энтальпии пара на выходе из крайних ширм (п. 15.26),

$$i'_{\text{По1}} = i''_{\text{кр.ш}} = 3242 \text{ кДж/кг}.$$

А.15.64. Величина впрыска в пароохладитель принимается равной 60 % от суммарного впрыска в пароперегреватель, принятого ранее, при общем расчете пароперегревателя, равном 6,0 %:

$$p_{\text{впр1}} = 0,6 \cdot p_{\text{впр}} = 0,6 \cdot 6,0 = 3,6 \text{ } \%$$

А.15.65. Расход воды, впрыскиваемой в пароохладитель,

$$D_{\text{впр1}} = \frac{p_{\text{впр1}}}{100} \cdot D_{\text{пс}} = \frac{3,6}{100} \cdot 58,33 = 2,1 \text{ кг / с}$$

А.15.66. Давление в пароохладителе принимается равным давлению пара на выходе из крайних ширм (п. 15.28):

$$p_{\text{По1}} = 14,84 \text{ МПа}.$$

А.15.67. Энтальпия впрыскиваемой воды [2, табл. 5.8]

$$i_{\text{впр1}} = 1604 \text{ кДж/кг}.$$

А.15.68. Энтальпия пара за пароохладителем первой ступени (определяется из уравнения смешения)

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		137

$$i''_{\text{Пол}} = \frac{D_{\text{кр.ш}} \cdot i'_{\text{Пол}} + D_{\text{впр1}} \cdot i_{\text{впр}}}{D_{\text{кр.ш}} + D_{\text{впр1}}} = \frac{54,83 \cdot 3242 + 2,1 \cdot 1604}{54,83 + 2,1} = 3182 \text{ кДж / кг}$$

А.15.69. Температура пара за пароохладителем первой ступени [2, табл. 5.9]

$$t''_{\text{Пол}} = 457 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.15.70. Снижение температуры пара в пароохладителе первой ступени

$$\Delta t_{\text{Пол}} = t'_{\text{Пол}} - t''_{\text{Пол}} = 475 - 457 = 18 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Расчет средних ширм

А.15.71. Расход пара в средних ширмах

$$D = D_{\text{кр.ш}} + D_{\text{впр1}} = 54,83 + 2,1 = 56,93 \text{ кг/с}.$$

А.15.72. Температура газов на входе принимается равной температуре газов на выходе из топки, определенной ранее, при расчете топки (п. А.11.33):

$$g'_{\text{r}} = 1049 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (} T'_{\text{r}} = 1322 \text{ K)}.$$

А.15.73. Энтальпия газов на входе принимается равной энтальпии газов на выходе из топки, определенной ранее, при расчете топки (п. А.11.35):

$$I'_{\text{r}} = 12346 \text{ кДж/кг}.$$

А.15.74. Температура пара на входе в ступень принимается равной температуре пара на выходе из пароохладителя первой ступени, рассчитанной ранее (п. А.15.69):

$$t' = 457 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.15.75. Давление пара на входе принимается равным давлению пара на выходе из первой ступени пароперегревателя, рассчитанной ранее (п. А.15.28):

$$p' = 14,84 \text{ МПа}.$$

А.15.76. Энтальпия пара на входе принимается равной энтальпии пара на выходе из пароохладителя первой ступени, рассчитанной ранее (п. 15.68):

$$i' = 3182 \text{ кДж/кг}.$$

А.15.77. Температура газов на выходе (принимается предварительно с последующим уточнением)

$$g''_{\text{r}} = 915 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (} T''_{\text{r}} = 1188 \text{ K)}.$$

А.15.78. Средняя температура дымовых газов в ступени

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		138



А.15.88. Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока при сжигании заданного топлива

$$kps = (k_r^0 \cdot r_n + k_{зл} \cdot \mu_{зл}) \cdot p \cdot s = (2,64 + 1,02) \cdot 0,1 \cdot 0,728 = 0,266.$$

А.15.89. Степень черноты потока газов при средней температуре  $T_{г.ср}$  и давлении  $p = 0,1$  МПа

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,266} = 0,234.$$

А.15.90. Сумма угловых коэффициентов [2, табл. 8.1]

$$\Sigma x_p = 0,678.$$

А.15.91. Тепло, воспринимаемое ступенью излучением из топки,

$$Q_{л} = \frac{q_{л.вых} \cdot \frac{F_{вых}}{2} \cdot \sum x_p \cdot (1-a)}{B_p} = \frac{64,66 \cdot \frac{69,5}{2} \cdot 0,678 \cdot (1-0,234)}{7} = 166,7 \text{ кДж / кг}$$

А.15.92. Тепло излучения из топки, проходящее сквозь ширмы на третью ступень пароперегревателя,

$$Q_{л} = \frac{q_{л.вых} \cdot \frac{F_{вых}}{2} \cdot [1 - \sum x_p \cdot (1-a)]}{B_p} = \frac{64,66 \cdot \frac{69,5}{2} \cdot [1 - 0,678 \cdot (1-0,234)]}{7} = 154,3 \text{ кДж / кг}$$

А.15.93. Энтальпия пара на выходе из средних ширм подсчитывается из уравнения теплового баланса ступени по пару  $Q_{б.п} = \frac{D}{B_p} (i'' - i') - Q_{л}$ , исходя из того,

что  $Q_{б.г} = Q_{б.п}$ :

$$i'' = i' + \frac{B_p \cdot (Q_{б.г} + Q_{л})}{D} = 3182 + \frac{7 \cdot (859 + 166,7)}{56,93} = 3308 \text{ кДж / кг}$$

А.15.94. Потеря давления в ширмах

$$\Delta p_{ш} = 0,1 \frac{p_{пе}}{5} = 0,1 \frac{14}{5} = 0,28 \text{ МПа}$$

где 5 – число ступеней пароперегревателя.

А.15.95. Давление перегретого пара на выходе из ступени

$$p'' = p' - \Delta p_{ш} = 14,84 - 0,28 = 14,56 \text{ МПа.}$$

А.15.96. Среднее давление перегретого пара в ступени

$$p_{cp} = \frac{p' + p''}{2} = \frac{14,84 + 14,56}{2} = 14,70 \text{ МПа}$$

А.15.97. Температура пара на выходе из ступени по значению  $i''$  при давлении  $p''$  [2, табл. 5.9],

$$t'' = 497 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.15.98. Тепло, воспринимаемое паром по уравнению теплового баланса (для контроля),

$$Q_{б.п} = \frac{D}{B_p} (i'' - i') - Q_{л} = \frac{56,93}{7} (3308 - 3182) - 166,7 = 859 \text{ кДж / кг}$$

А.15.99. Средняя температура пара в ступени

$$t_{cp} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{457 + 497}{2} = 477 \text{ }^\circ\text{C}$$

А.15.100. Средняя скорость дымовых газов

$$\omega_r = \frac{B_p \cdot V_r^H \cdot (\vartheta_{r,cp} + 273)}{F_r \cdot 273} = \frac{7 \cdot 7,481 \cdot (982 + 273)}{35,5 \cdot 273} = 6,78 \text{ м/с}.$$

А.15.101. Коэффициент теплопроводности газов, с учетом поправки на их состав [2, 10],

$$\lambda_r \cdot 10^2 = 10,71 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

А.15.102. Коэффициент кинематической вязкости газов, с учетом поправки на их состав [2, разд. 10],

$$\nu_r \cdot 10^6 = 163,2 \text{ м}^2\text{/с}.$$

А.15.103. Критерий Прандтля для газов, с учетом поправки на их состав [2, разд. 10],

$$Pr_r = 0,58.$$

А.15.104. Поправка на геометрическую компоновку пучка [2, п. 10.3.5]

$$C_s = \left[ 1 + (2\sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[ 1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,19}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,69,$$

где принято, что  $\sigma_1 = 3$ , поскольку  $\sigma_1 > 3$ .

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		141

А.15.105. Поправка на число рядов труб по ходу газов для коридорного пучка [2, п. 10.3.5]

$$C_z = 1.$$

А.15.106. Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенке

$$\begin{aligned}\alpha_k &= 0,2 \cdot C_s \cdot C_z \cdot \frac{\lambda_r}{d} \left( \frac{\omega_r \cdot d}{v_r} \right)^{0,65} \cdot Pr_r^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 0,69 \cdot 1 \cdot \frac{10,71 \cdot 10^{-2}}{0,032} \left( \frac{6,78 \cdot 0,032}{163,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,58^{0,33} = 41,38 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\end{aligned}$$

А.15.107. Средний удельный объем пара [2, табл. 5.9]

$$v_{\text{п}} = 0,020264 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

А.15.108. Расчетная скорость пара

$$\omega_{\text{п}} = \frac{D \cdot v_{\text{п}}}{f_{\text{п}}} = \frac{56,93 \cdot 0,020264}{0,0608} = 18,97 \text{ м/с}$$

А.15.109. Коэффициент теплопроводности пара [2, разд. 10]

$$\lambda_{\text{п}} \cdot 10^2 = 7,93 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

А.15.110. Коэффициент кинематической вязкости пара [2, разд. 10]

$$v_{\text{п}} \cdot 10^6 = 0,573 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.15.111. Критерий Прандтля для пара [2, разд. 10]

$$Pr_{\text{п}} = 1,072.$$

А.15.112. Поправка на температуру потока пара [2, разд. 10]

$$C_t = 1,0.$$

А.15.113. Поправка на длину канала [2, разд. 10]

$$C_l = 1,0.$$

А.15.114. Поправка на форму канала [2, разд. 10]

$$C_k = 1,0.$$

А.15.115. Коэффициент теплоотдачи от стенки к пару [2, п. 10.3.7]

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\text{п}}}{d_{\text{вн}}} \left( \frac{\omega_{\text{п}} \cdot d_{\text{вн}}}{v} \right)^{0,8} \cdot Pr_{\text{п}}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_k = \\ &= 0,023 \cdot \frac{7,93 \cdot 10^{-2}}{0,022} \left( \frac{18,97 \cdot 0,022}{0,573 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,072^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 4174 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\end{aligned}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		142

А.15.116. Степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающей поверхности [2, п. 10.3.12]

$$a_3 = 0,8.$$

А.15.117. Коэффициент загрязнения поверхности [2, п. 10.4.2]

$$\varepsilon = 0,005.$$

А.15.118. Абсолютная температура загрязненной наружной поверхности труб

$$\begin{aligned} T_3 &= t_{cp} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{B_p}{H} \cdot (Q_6 + Q_n) \cdot 10^3 + 273 = \\ &= 477 + \left( 0,005 + \frac{1}{4174} \right) \cdot \frac{7}{176} \cdot (859 + 166,7) \cdot 10^3 + 273 = 964\text{K} \end{aligned}$$

А.15.119. Коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания

$$\begin{aligned} \alpha_n &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{r,cp})^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_3}{T_{r,cp}} \right)^4}{1 - \frac{T_3}{T_{r,cp}}} = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,234 \cdot (1255)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{964}{1255} \right)^4}{1 - \frac{964}{1255}} = 66,36 \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

А.15.120. Коэффициент использования поверхности [2, п. 10.4.1]

$$\xi = 0,8.$$

А.15.121. Коэффициент теплоотдачи от газов к стенкам труб

$$\alpha_1 = \xi \cdot \left( \alpha_k \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sigma_2 \cdot x} + \alpha_n \right) = 0,8 \cdot \left( 41,38 \cdot \frac{3,14}{2 \cdot 1,19 \cdot 0,679} + 66,36 \right) = 117,4 \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.15.122. Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left( 1 + \frac{Q_n}{Q_{6,r}} \right) \cdot \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \alpha_1} = \frac{117,4}{1 + \left( 1 + \frac{166,7}{859} \right) \cdot \left( 0,005 + \frac{1}{4174} \right) \cdot 117,4} = 67,69 \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.15.123. Разность температур на входе в ступень

$$\Delta t' = \vartheta'_r - t' = 1049 - 457 = 592 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

А.15.124. Разность температур на выходе из ступени

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		143

$$\Delta t'' = \vartheta''_r - t'' = 915 - 497 = 418 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.15.125. Температурный напор при прямотоке

$$\Delta t_{\text{прт}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{592 - 418}{\ln\left(\frac{592}{418}\right)} = 500^\circ\text{C}$$

А.15.126. Тепло, передаваемое ступени по уравнению теплопередачи,

$$Q_{\text{т}} = \frac{K \cdot \Delta t_{\text{прт}} \cdot H}{B_{\text{п}}} = \frac{67,69 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 176}{7} = 851 \text{ кДж/кг}.$$

А.15.127. Невязка теплового баланса ступени

$$|\Delta Q| = \frac{(Q_{\text{б}} - Q_{\text{т}}) \cdot 100}{Q_{\text{б}}} = \frac{859 - 851}{859} \cdot 100 = 0,93\%$$

Она невелика, что свидетельствует о достаточно высокой точности проведенного расчета. Допускаемая величина невязки теплового баланса ступени – менее чем 2 %.

15.128. Температура газов за крайними и средними ширмами после их смешения

$$\vartheta''_{\text{г.ш}} = \frac{\vartheta''_{\text{г.кр.ш}} + \vartheta''_{\text{г.ср.ш}}}{2} = \frac{909 + 915}{2} = 912^\circ\text{C}.$$

А.15.129. Энтальпия газов за крайними и средними ширмами после их смешения

$$I''_{\text{г.ш}} = \frac{I''_{\text{г.кр.ш}} + I''_{\text{г.ср.ш}}}{2} = \frac{10541 + 10618}{2} = 10580 \text{ кДж/кг}.$$

## А.16 Расчет пароотводящих труб

А.16.1. Температура газов на входе принимается равной температуре газов за крайними и средними ширмами после их смешения (п. 15.128):

$$\vartheta'_r = \vartheta''_{r,ш} = 912^\circ\text{C}.$$

А.16.2. Энтальпия газов на входе принимается равной температуре газов за крайними и средними ширмами после их смешения (п. 15.129):

$$I'_r = I''_{r,ш} = 10580 \text{ кДж/кг}.$$

А.16.3. Температура газов на выходе принимается на  $10^\circ\text{C}$  меньше температуры газов на входе:

$$\vartheta''_r = \vartheta'_r - 10 = 912 - 10 = 902^\circ\text{C}.$$

А.16.4. Энтальпия газов на выходе (по табл. 2.2)

$$I''_r = 10451 \text{ кДж/кг}.$$

А.16.5. Количество тепла, отдаваемое дымовыми газами,

$$Q_{6,r} = \phi \cdot (I'_r - I''_r + \Delta\alpha_{ш} \cdot I_{0,прс}) = 0,994 \cdot (10580 - 10451 + 0,0 \cdot 229) = 128 \text{ кДж / кг}.$$

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		145

## А.17 Расчет третьей по ходу пара ступени пароперегревателя

### А.17.1. Конструктивные характеристики третьей ступени пароперегревателя:

- Тип ступени – шахматная, прямоточная.
- Диаметр труб наружный  $d = 38$  мм.
- Диаметр труб внутренний  $d_{\text{вн}} = 22$  мм.
- Поперечный шаг труб  $S_1 = 160$  мм.
- Относительный поперечный шаг труб  $\sigma_1 = 4,21$ .
- Продольный шаг труб  $S_2 = 62$  мм.
- Относительный продольный шаг труб  $\sigma_2 = 1,63$ .
- Средний диагональный шаг труб  $\sigma'_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} + \sigma_2^2} = 2,66$ .
- Величина  $\phi = (\sigma_1 - 1) / (\sigma'_2 - 1) = 1,93$ .
- Число рядов труб по ходу газов  $z_2 = 6$ .
- Сечение для прохода пара  $f_{\text{п}} = 0,0687$  м<sup>2</sup>.
- Сечение для прохода газов  $F_{\text{г}} = 18,85$  м<sup>2</sup>.
- Поверхность нагрева  $H = 186$  м<sup>2</sup>.
- Глубина пакета  $l_{\text{п}} = 1,75$  м<sup>2</sup>.
- Глубина газового объема  $l_{\text{об}} = 0,5$  м.

А.17.2. Расход пара в третьей ступени пароперегревателя принимается равным расходу пара в средних ширмах (п. 15.71):

$$D = D_{\text{ср.ш}} = 56,93 \text{ кг/с.}$$

А.17.3. Температура газов на входе в ступень принимается равной температуре газов за паропроводящими трубами (п. 16.3):

$$g'_{\text{г}} = 902 \text{ }^\circ\text{C} \quad (T'_{\text{г}} = 1175 \text{ K}).$$

А.17.4. Энтальпия газов на входе принимается равной энтальпии газов за паропроводящими трубами (п. 16.4):

$$I'_{\text{г}} = 10451 \text{ кДж/кг}$$

А.17.5. Температура пара на входе в ступень принимается равной температуре пара на выходе из средних ширм, рассчитанных ранее (п. 15.97):

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		146

$$t' = 497 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

А.17.6. Давление пара на входе принимается равным давлению пара на выходе из средних ширм (п. 15.95):

$$p' = 14,56 \text{ МПа}.$$

А.17.7. Энтальпия пара на входе принимается равной энтальпии пара на выходе из средних ширм (п. 15.93):

$$i' = 3308 \text{ кДж / кг}$$

А.17.8. Температура газов на выходе принимается предварительно (с последующим уточнением):

$$t''_r = 850 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (T''_r = 1123 \text{ К}).$$

А.17.9. Энтальпия газов на выходе (по табл. 2.2)

$$I''_r = 9895 \text{ кДж/кг}$$

А.17.10. Средняя температура дымовых газов в ступени

$$t_{r, \text{cp}} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{902 + 850}{2} = 876 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (T_{r, \text{cp}} = 1149 \text{ К}).$$

А.17.11. Энтальпия присасываемого в ступень холодного воздуха при  $t_{\text{хв}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$I_{\text{опрс}} = I_{\text{охв}} = 229 \text{ кДж/кг}.$$

А.17.12. Тепло, отдаваемое дымовыми газами по уравнению теплового баланса,

$$Q_{\text{б.г}} = \phi \cdot (I' - I'' + \Delta\alpha_{\text{кпез}} \cdot I_{\text{опрс}}) = 0,994 \cdot (10451 - 9895 + 0,015 \cdot 229) = 556 \text{ кДж / кг}$$

А.17.13. Тепло, воспринимаемое ступенью излучением из топки; оно равно теплу излучения из топки, проходящему сквозь крайние и средние ширмы:

$$Q_{\text{л}} = 154,3 + 154,3 = 308,6 \text{ кДж/кг}.$$

А.17.14. Энтальпия пара на выходе из ступени подсчитывается из уравнения теплового баланса ступени по пару  $Q_{\text{б.п}} = \frac{D}{B_p} (i'' - i') - Q_{\text{л}}$ , исходя из того, что  $Q_{\text{б.г}} = Q_{\text{б.п}}$ :

$$i'' = i' + \frac{B_p \cdot (Q_{\text{б.г}} + Q_{\text{л}})}{D} = 3308 + \frac{7 \cdot (556 + 308,6)}{56,93} = 3414 \text{ кДж / кг}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		147

А.17.15. Потеря давления в ступени

$$\Delta p_{\text{Кте3}} = 0,1 \frac{p_{\text{пе}}}{5} = 0,1 \frac{14}{5} = 0,28 \text{ МПа}$$

где 5 – число ступеней пароперегревателя.

А.17.16. Давление перегретого пара на выходе из ступени

$$p'' = p' - \Delta p_{\text{Кте3}} = 14,56 - 0,28 = 14,28 \text{ МПа.}$$

А.17.17. Среднее давление перегретого пара в ступени

$$p_{\text{ср}} = \frac{p' + p''}{2} = \frac{14,56 + 14,28}{2} = 14,42 \text{ МПа}$$

А.17.18. Температура пара на выходе из ступени по значению  $i''$  при давлении  $p''$  [2, табл. 5.9],

$$t'' = 534 \text{ }^\circ\text{C.}$$

А.17.19. Тепло, воспринимаемое паром по уравнению теплового баланса (для контроля),

$$Q_{\text{б.п}} = \frac{D}{B_p} (i'' - i') - Q_{\text{л}} = \frac{56,93}{7} (3414 - 3308) - 308,6 = 553 \text{ кДж / кг}$$

А.17.20. Средняя температура пара в ступени

$$t_{\text{ср}} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{497 + 534}{2} = 515,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

А.17.21. Средняя скорость дымовых газов

$$\omega_{\text{г}} = \frac{B_p \cdot V_{\text{г}}^{\text{н}} \cdot (t_{\text{г.ср}} + 273)}{F_{\text{г}} \cdot 273} = \frac{7 \cdot 7,527 \cdot (876 + 273)}{35,5 \cdot 273} = 6,25 \text{ м/с.}$$

А.17.22. Коэффициент теплопроводности газов, с учетом поправки на их состав [2, 10],

$$\lambda_{\text{г}} \cdot 10^2 = 9,78 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К).}$$

А.17.23. Коэффициент кинематической вязкости газов, с учетом поправки на их состав [2, разд. 10],

$$\nu_{\text{г}} \cdot 10^6 = 141,2 \text{ м}^2\text{/с.}$$

А.17.24. Критерий Прандтля для газов, с учетом поправки на их состав [2, разд. 10],

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						148
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\text{Pr}_r = 0,582.$$

А.17.25. Поправка на геометрическую компоновку шахматного пучка [2, п. 10.3.4]

$$C_s = 0,95 \cdot \phi^{0,1} = 0,95 \cdot 1,93^{0,1} = 1,01,$$

А.17.26. Поправка на число рядов труб по ходу газов для шахматного пучка [2, п. 10.3.5]

$$C_z = 4,0 \cdot z_2^{0,02} - 3,2 = 4,0 \cdot 6^{0,02} - 3,2 = 0,95$$

А.17.27. Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенке

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,36 \cdot C_s \cdot C_z \cdot \frac{\lambda_r}{d} \left( \frac{\omega_r \cdot d}{v_r} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}_r^{0,33} = \\ &= 0,36 \cdot 1,01 \cdot 0,95 \cdot \frac{9,78 \cdot 10^{-2}}{0,038} \left( \frac{6,25 \cdot 0,038}{141,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,582^{0,33} = 64,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.17.28. Средний удельный объем пара [2, табл. 5.9]

$$v_{\text{п}} = 0,022488 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

А.17.29. Расчетная скорость пара

$$\omega_{\text{п}} = \frac{D \cdot v_{\text{п}}}{f_{\text{п}}} = \frac{56,93 \cdot 0,022488}{0,0687} = 18,64 \text{ м/с}$$

А.17.30. Коэффициент теплопроводности пара [2, разд. 10]

$$\lambda_{\text{п}} \cdot 10^2 = 8,19 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

А.17.31. Коэффициент кинематической вязкости пара [2, разд. 10]

$$v_{\text{п}} \cdot 10^6 = 0,672 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.17.32. Критерий Прандтля для пара [2, разд. 10]

$$\text{Pr}_{\text{п}} = 1,02.$$

А.17.33. Поправка на температуру потока пара [2, разд. 10]

$$C_t = 1,0.$$

А.17.34. Поправка на длину канала [2, разд. 10]

$$C_l = 1,0.$$

А.17.35. Поправка на форму канала [2, разд. 10]

$$C_k = 1,0.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		149

А.17.36. Коэффициент теплоотдачи от стенки к пару [2, п. 10.3.7]

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\text{п}}}{d_{\text{вн}}} \left( \frac{\omega_{\text{п}} \cdot d_{\text{вн}}}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{п}}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_k =$$

$$= 0,023 \cdot \frac{8,19 \cdot 10^{-2}}{0,022} \left( \frac{18,64 \cdot 0,022}{0,672 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,02^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 3668 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

А.17.37. Эффективная толщина излучающего слоя [2, п. 10.3.15]

$$s = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{3,14} \cdot 4,21 \cdot 1,63 - 1 \right) = 0,265 \text{ м}$$

А.17.38. Давление газов в газоходе пароперегревателя

$$p = 0,1 \text{ МПа.}$$

А.17.39. Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания

$$k_{\text{г}} = k_{\text{г}}^0 \cdot r_{\text{п}} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_{\text{п}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{г.ср}}) \cdot r_{\text{п}} =$$

$$= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,093}{\sqrt{10 \cdot 0,1 \cdot 0,234 \cdot 0,265}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 1149) \cdot 0,234 = 4,79 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.17.40. Коэффициент  $A_{\text{зл}}$  для топлива [2, табл. 6.1]

$$A_{\text{зл}} = 0,8.$$

А.17.41. Коэффициент поглощения лучей частицами летучей золы

$$k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}} = \frac{10^4 \cdot A_{\text{зл}}}{\sqrt[3]{(T_{\text{г.ср}})^2}} \cdot \frac{\mu_{\text{зл}}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{\text{зл}} \cdot s} = \frac{10^4 \cdot 0,8}{\sqrt[3]{1149^2}} \cdot \frac{0,015}{1 + 1,2 \cdot 0,015 \cdot 0,265} = 1,09 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

А.17.42. Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока при сжигании заданного топлива

$$kps = (k_{\text{г}}^0 \cdot r_{\text{п}} + k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}}) \cdot p \cdot s = (4,79 + 1,09) \cdot 0,1 \cdot 0,265 = 0,156.$$

А.17.43. Степень черноты потока газов, при средней температуре  $T_{\text{г.ср}}$  и давлении  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ,

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,156} = 0,144.$$

А.17.44. Степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающей поверхности [2, п. 10.3.12]

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		150

$$a_3 = 0,8.$$

А.17.45. Коэффициент тепловой эффективности, учитывающий влияние загрязнения поверхности и неполноты омывания ее газами [2, п. 10.4.4]

$$\psi = 0,52.$$

А.17.46. Предварительно принимаемое значение абсолютной температуры загрязненной наружной поверхности труб

$$T_{з.пр} = 1000 \text{ К.}$$

А.17.47. Предварительное значение коэффициента теплоотдачи излучением продуктов сгорания

$$\begin{aligned} \alpha_{л.пр} &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{г.сп})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_{з.пр}}{T_{г.сп}}\right)^4}{1 - \frac{T_{з.пр}}{T_{г.сп}}} = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,144 \cdot (1149)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{1000}{1149}\right)^4}{1 - \frac{1000}{1149}} = 36,64 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

А.17.48. Коэффициент использования поверхности [2, п. 10.4.1]

$$\xi = 1,0.$$

А.17.49. Предварительное значение коэффициента теплоотдачи от газов к стенке

$$\alpha_{1.пр} = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_{л.пр}) = 1,0 \cdot (64,1 + 36,64) = 100,74 \text{ Вт} (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

А.17.50. Расчетное значение абсолютной температуры загрязненной наружной поверхности труб

$$\begin{aligned} T_3 &= t_{сп} + \left[ \frac{1}{\psi} \left( \frac{1}{\alpha_{1.пр}} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \frac{1}{\alpha_{1.пр}} \right] \cdot \frac{B_p}{H} \cdot (Q_6 + Q_n) \cdot 10^3 + 273 = \\ &= 515,5 + \left[ \frac{1}{0,52} \left( \frac{1}{100,74} + \frac{1}{3668} \right) - \frac{1}{100,74} \right] \cdot \frac{7}{186} \cdot (553 + 308,6) \cdot 10^3 + 273 = 1010 \text{ К} \end{aligned}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		151

Полученное расчетное значение абсолютной температуры загрязненной наружной поверхности труб пароперегревателя мало отличается от предварительно принятого и уточнения не требует.

А.17.51. Расчетный коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания

$$\alpha_{\text{л}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{\text{г.ср}})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_{\text{з.пр}}}{T_{\text{г.ср}}}\right)^4}{1 - \frac{T_{\text{з.пр}}}{T_{\text{г.ср}}}} =$$

$$= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,144 \cdot (1149)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{1010}{1149}\right)^4}{1 - \frac{1010}{1149}} = 37,13 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.17.52. Коэффициент А для заданного топлива [2, п. 10.3.16]

$$A = 0,4.$$

А.17.53. Коэффициент теплоотдачи, с учетом излучения газовых объемов в межтрубном пространстве,

$$\alpha'_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \cdot \left[ 1 + A \cdot \left(\frac{T'_{\text{г}}}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{l_{\text{ог}}}{l_{\text{п}}}\right)^{0,07} \right] = 37,13 \cdot \left[ 1 + 0,4 \cdot \left(\frac{1175}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,5}{1,75}\right)^{0,07} \right] = 51,29 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.17.54. Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке [2, п. 10.3.2]

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_{\text{к}} + \alpha'_{\text{л}}) = 1,0 \cdot (64,1 + 51,29) = 115,39 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

А.17.55. Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,52 \cdot 115,39}{1 + \frac{115,39}{3668}} = 58,17$$

А.17.56. Разность температур на входе в ступень

$$\Delta t' = g'_{\text{г}} - t' = 902 - 497 = 405 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

А.17.57. Разность температур на выходе из ступени

$$\Delta t'' = g''_{\text{г}} - t'' = 850 - 534 = 316 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

А.17.58. Температурный напор в ступени при прямотоке

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		152

$$\Delta t_{\text{прт}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{405 - 316}{\ln\left(\frac{405}{316}\right)} = 358,7^{\circ}\text{C}.$$

А.17.59. Тепло, передаваемое ступени по уравнению теплопередачи,

$$Q_{\text{т}} = \frac{K \cdot \Delta t_{\text{прт}} \cdot H}{B_{\text{п}}} = \frac{58,17 \cdot 10^{-3} \cdot 358,7 \cdot 186}{7} = 554 \text{ кДж/кг}.$$

А.17.60. Невязка теплового баланса ступени

$$|\Delta Q| = \frac{(Q_{\text{б}} - Q_{\text{т}}) \cdot 100}{Q_{\text{б}}} = \frac{553 - 554}{553} \cdot 100 = 0,18\%$$

Она невелика, что свидетельствует о достаточно высокой точности проведенного расчета. Допускаемая величина невязки теплового баланса ступени – менее чем 2 %.

## А.18 Расчет пароохладителя второй ступени

А.18.1. Пароохладитель второй ступени впрыскивающий, расположен между третьей и четвертой ступенями пароперегревателя. Задачей его расчета является определение изменения (снижения) температуры пара за счет испарения впрыскиваемой воды.

А.18.2. Температура пара на входе в пароохладитель, равная температуре пара на выходе из третьей ступени пароперегревателя (п. 17.18),

$$t'_{\text{По2}} = t''_{\text{Кпе3}} = 534 \text{ }^\circ\text{C} .$$

А.18.3. Энтальпия пара на входе в пароохладитель, равная энтальпии пара на выходе из третьей ступени пароперегревателя (п. 17.14),

$$i'_{\text{По2}} = i''_{\text{Кпе3}} = 3414 \text{ кДж/кг} .$$

А.18.4. Величина впрыска в пароохладитель принимается равной 40 % от суммарного впрыска в пароперегреватель, принятого ранее, при общем расчете пароперегревателя, равном 6,0 %:

$$p_{\text{впр1}} = 0,4 \cdot p_{\text{впр}} = 0,4 \cdot 6,0 = 2,4 \text{ } \% .$$

А.18.5. Расход воды, впрыскиваемой в пароохладитель,

$$D_{\text{впр2}} = \frac{p_{\text{впр2}}}{100} \cdot D_{\text{пе}} = \frac{2,4}{100} \cdot 58,33 = 1,4 \text{ кг / с}$$

А.18.6. Давление в пароохладителе принимается равным давлению пара на выходе из третьей ступени пароперегревателя (п. 17.16):

$$p_{\text{По2}} = 14,28 \text{ МПа} .$$

А.18.7. Энтальпия впрыскиваемой воды [2, табл. 5.8]

$$i_{\text{впр2}} = 1582 \text{ кДж/кг} .$$

А.18.8. Энтальпия пара за пароохладителем второй ступени (определяется из уравнения смешения)

$$i''_{\text{По2}} = \frac{D_{\text{кпе3}} \cdot i'_{\text{По2}} + D_{\text{впр2}} \cdot i_{\text{впр2}}}{D_{\text{кпе3}} + D_{\text{впр2}}} = \frac{56,93 \cdot 3414 + 1,4 \cdot 1582}{56,93 + 1,4} = 3370 \text{ кДж / кг}$$

А.18.9. Температура пара за пароохладителем второй ступени [2, табл. 5.9]

$$t''_{\text{По2}} = 518 \text{ }^\circ\text{C} .$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		154

А.18.10. Снижение температуры пара в пароохладителе второй ступени

$$\Delta t_{\text{По2}} = t'_{\text{По2}} - t''_{\text{По2}} = 534 - 518 = 16 \text{ }^\circ\text{C}.$$

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		155

## А.19 Расчет четвертой по ходу пара ступени пароперегревателя

А.19.1. Конструктивные характеристики четвертой ступени пароперегревателя:

- Тип ступени – коридорная, прямоточная.
- Диаметр труб наружный  $d = 32$  мм.
- Диаметр труб внутренний  $d_{\text{вн}} = 22$  мм.
- Поперечный шаг труб  $S_1 = 80$  мм.
- Относительный поперечный шаг труб  $\sigma_1 = 2,5$ .
- Продольный шаг труб  $S_2 = 66$  мм.
- Относительный продольный шаг труб  $\sigma_2 = 2,06$ .
- Средний диагональный шаг труб  $\sigma'_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} + \sigma_2^2} = 2,66$ .
- Величина  $\phi = (\sigma_1 - 1) / (\sigma'_2 - 1) = 1,93$ .
- Число рядов труб по ходу газов  $z_2 = 10$ .
- Сечение для прохода пара  $f_{\text{п}} = 0,0687$  м<sup>2</sup>.
- Сечение для прохода газов  $F_{\text{г}} = 12,9$  м<sup>2</sup>.
- Поверхность нагрева  $H_{\text{уст}} = 320$  м<sup>2</sup>.
- Число змеевиков  $n_{\text{зм}} = 126$ .
- Глубина пакета  $l_{\text{п}} = 2,75$  м<sup>2</sup>.
- Глубина газового объема  $l_{\text{об}} = 0,5$  м.

19.2. Расход пара в четвертой ступени, равный расходу пара в третьей ступени пароперегревателя плюс расход впрыскиваемой воды в пароохладителе второй ступени:

$$D = D_{\text{кпе3}} + D_{\text{впр2}} = 56,93 + 1,4 = 58,33 \text{ кг/с.}$$

А.19.3. Температура газов на входе в ступень принимается равной температуре газов на выходе из третьей ступени (п. 17.8):

$$g'_{\text{г}} = 850 \text{ }^\circ\text{C} \quad (T'_{\text{г}} = 1123 \text{ K}).$$

А.19.4. Энтальпия газов на входе принимается равной энтальпии газов на выходе из третьей ступени (п. 17.9):

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		156

$$I'_r = 9895 \text{ кДж/кг}$$

А.19.5. Температура пара на входе в ступень принимается равной температуре пара на выходе из пароохладителей второй ступени (п. 18.9):

$$t' = 518 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.19.6. Давление пара на входе принимается равным давлению пара на выходе из третьей ступени (п. 17.16):

$$p' = 14,28 \text{ МПа}.$$

А.19.7. Энтальпия пара на входе принимается равной энтальпии пара на выходе из пароохладителей второй ступени (п. 18.8):

$$i' = 3370 \text{ кДж / кг}$$

А.19.8. Температура газов на выходе принимается равной температуре газов на входе в первую ступень пароперегревателя (п. 14.6):

$$g''_r = 800 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (} T''_r = 1073 \text{ К)}.$$

А.19.9. Энтальпия газов на выходе принимается равной энтальпии газов на входе в первую ступень пароперегревателя, рассчитанную ранее (п. 14.7):

$$I''_r = 9254 \text{ кДж/кг}$$

А.19.10. Средняя температура дымовых газов в ступени

$$g_{r, \text{cp}} = \frac{g' + g''}{2} = \frac{850 + 800}{2} = 825 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (} T''_{r, \text{cp}} = 1098 \text{ К)}.$$

А.19.11. Энтальпия присасываемого в ступень холодного воздуха при  $t_{\text{хв}} = 30$  °С

$$I_{\text{прс}} = I_{0\text{хв}} = 229 \text{ кДж/кг}.$$

А.19.12. Тепло, отдаваемое дымовыми газами по уравнению теплового баланса,

$$Q_{б.г} = \phi \cdot (I' - I'' + \Delta\alpha_{\text{кпе4}} \cdot I_{\text{прс}}) = 0,994 \cdot (9895 - 9254 + 0,015 \cdot 229) = 641 \text{ кДж / кг}$$

А.19.13. Тепло, воспринимаемое ступенью излучением из топки, не учитывается, т.е:

$$Q_{\text{л}} = 0.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		157

А.19.14. Энтальпия пара на выходе из ступени подсчитывается из уравнения теплового баланса ступени по пару  $Q_{б.п} = \frac{D}{B_p}(i'' - i') - Q_{л}$ , исходя из того, что  $Q_{б.г} = Q_{б.п}$ :

$$i'' = i' + \frac{B_p \cdot (Q_{б.г} + Q_{л})}{D} = 3370 + \frac{7 \cdot (641 + 0)}{58,33} = 3447 \text{ кДж / кг}$$

А.19.15. Потеря давления в ступени

$$\Delta p_{Кпе4} = 0,1 \frac{p_{пе}}{5} = 0,1 \frac{14}{5} = 0,28 \text{ МПа}$$

где 5 – число ступеней пароперегревателя.

А.19.16. Давление перегретого пара на выходе из ступени

$$p'' = p' - \Delta p_{Кпе4} = 14,28 - 0,28 = 14,0 \text{ МПа.}$$

А.19.17. Среднее давление перегретого пара в ступени

$$p_{ср} = \frac{p' + p''}{2} = \frac{14,28 + 14,0}{2} = 14,14 \text{ МПа}$$

А.19.18. Температура пара на выходе из ступени по значению  $i''$  при давлении  $p''$  [2, табл. 5.9],

$$t'' = 544,8 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Ее величина мало отличается от заданной температуры перегрева пара, равной  $t'' = 545 \text{ }^\circ\text{C}$ , что свидетельствует о высокой точности проведения расчета пароперегревателя.

А.19.19. Тепло, воспринимаемое паром по уравнению теплового баланса (для контроля),

$$Q_{б.п} = \frac{D}{B_p}(i'' - i') - Q_{л} = \frac{58,33}{7}(3447 - 3370) - 0 = 641 \text{ кДж / кг}$$

А.19.20. Средняя температура пара в ступени

$$t_{ср} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{518 + 545}{2} = 531,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

А.19.21. Средняя скорость дымовых газов

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		158

$$\omega_r = \frac{B_p \cdot V_r^H \cdot (\vartheta_{r, \text{ср}} + 273)}{F_r \cdot 273} = \frac{7 \cdot 7,527 \cdot (825 + 273)}{35,5 \cdot 273} = 5,97 \text{ м/с.}$$

А.19.22. Коэффициент теплопроводности газов, с учетом поправки на их состав [2, 10],

$$\lambda_r \cdot 10^2 = 9,35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

А.19.23. Коэффициент кинематической вязкости газов, с учетом поправки на их состав [2, разд. 10],

$$v_r \cdot 10^6 = 131 \text{ м}^2/\text{с}.$$

А.19.24. Критерий Прандтля для газов, с учетом поправки на их состав [2, разд. 10],

$$Pr_r = 0,588.$$

А.19.25. Поправка на геометрическую компоновку пучка [2, п. 10.3.4]

$$C_s = 1$$

А.19.26. Поправка на число рядов труб по ходу газов [2, п. 10.3.5]

$$C_z = 1$$

А.19.27. Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенке

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,2 \cdot C_s \cdot C_z \cdot \frac{\lambda_r}{d} \left( \frac{\omega_r \cdot d}{v_r} \right)^{0,65} \cdot Pr_r^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{9,35 \cdot 10^{-2}}{0,032} \left( \frac{5,97 \cdot 0,032}{131 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,588^{0,33} = 55,86 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

А.19.28. Средний удельный объем пара [2, табл. 5.9]

$$v_{\text{п}} = 0,023698 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

А.19.29. Расчетная скорость пара

$$\omega_{\text{п}} = \frac{D \cdot v_{\text{п}}}{f_{\text{п}}} = \frac{58,33 \cdot 0,023698}{0,0687} = 20,12 \text{ м/с}$$

А.19.30. Коэффициент теплопроводности пара [2, разд. 10]

$$\lambda_{\text{п}} \cdot 10^2 = 8,31 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

А.19.31. Коэффициент кинематической вязкости пара [2, разд. 10]

$$v_{\text{п}} \cdot 10^6 = 0,724 \text{ м}^2/\text{с}.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
						159
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

А.19.32. Критерий Прандтля для пара [2, разд. 10]

$$Pr_{\pi} = 1,0009.$$

А.19.33. Поправка на температуру потока пара [2, разд. 10]

$$C_t = 1,0.$$

А.19.34. Поправка на длину канала [2, разд. 10]

$$C_l = 1,0.$$

А.19.35. Поправка на форму канала [2, разд. 10]

$$C_k = 1,0.$$

А.19.36. Коэффициент теплоотдачи от стенки к пару [2, п. 10.3.7]

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\pi}}{d_{\text{вн}}} \left( \frac{\omega_{\pi} \cdot d_{\text{вн}}}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr_{\pi}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_k = \\ &= 0,023 \cdot \frac{8,31 \cdot 10^{-2}}{0,022} \left( \frac{20,12 \cdot 0,022}{0,724 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,0009^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 3699 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\end{aligned}$$

А.19.37. Эффективная толщина излучающего слоя [2, п. 10.3.15]

$$s = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left( \frac{4}{3,14} \cdot 2,5 \cdot 2,06 - 1 \right) = 0,160 \text{ м}$$

А.19.38. Давление газов в газоходе пароперегревателя

$$p = 0,1 \text{ МПа.}$$

А.19.39. Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания

$$\begin{aligned}k_r &= k_r^0 \cdot r_{\pi} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_{\pi} \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{г.ср}}) \cdot r_{\pi} = \\ &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,093}{\sqrt{10 \cdot 0,1 \cdot 0,234 \cdot 0,16}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 1098) \cdot 0,234 = 6,41 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}\end{aligned}$$

А.19.40. Коэффициент  $A_{\text{зл}}$  для топлива [2, табл. 6.1]

$$A_{\text{зл}} = 0,8.$$

А.19.41. Коэффициент поглощения лучей частицами летучей золы

$$k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}} = \frac{10^4 \cdot A_{\text{зл}}}{\sqrt[3]{(T_{\text{г.ср}})^2}} \cdot \frac{\mu_{\text{зл}}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{\text{зл}} \cdot s} = \frac{10^4 \cdot 0,8}{\sqrt[3]{1098^2}} \cdot \frac{0,015}{1 + 1,2 \cdot 0,015 \cdot 0,16} = 1,12 \frac{1}{(\text{м} \cdot \text{МПа})}$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		160

А.19.42. Суммарная оптическая толщина запыленного газового потока при сжигании заданного топлива

$$kps = (k_r^0 \cdot r_n + k_{зл} \cdot \mu_{зл}) \cdot p \cdot s = (6,41 + 1,12) \cdot 0,1 \cdot 0,16 = 0,12.$$

А.19.43. Степень черноты потока газов, при средней температуре  $T_{г.ср}$  и давлении  $p = 0,1$  МПа ,

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,12} = 0,113.$$

А.19.44. Степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающей поверхности [2, п. 10.3.12]

$$a_3 = 0,8.$$

А.19.45. Коэффициент тепловой эффективности, учитывающий влияние загрязнения поверхности и неполноты омывания ее газами [2, п. 10.4.4]

$$\psi = 0,54.$$

А.19.46. Предварительно принимаемое значение абсолютной температуры загрязненной наружной поверхности труб

$$T_{з.пр} = 980 \text{ К.}$$

А.19.47. Предварительное значение коэффициента теплоотдачи излучением продуктов сгорания

$$\begin{aligned} \alpha_{л.пр} &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{г.ср})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_{з.пр}}{T_{г.ср}}\right)^4}{1 - \frac{T_{з.пр}}{T_{г.ср}}} = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,113 \cdot (1098)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{980}{1098}\right)^4}{1 - \frac{980}{1098}} = 25,95 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

А.19.48. Коэффициент использования поверхности [2, п. 10.4.1]

$$\xi = 1,0.$$

А.19.49. Предварительное значение коэффициента теплоотдачи от газов к стенке

$$\alpha_{1.пр} = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_{л.пр}) = 1,0 \cdot (55,86 + 25,95) = 81,81 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		161

А.19.50. Расчетное значение абсолютной температуры загрязненной наружной поверхности труб

$$T_3 = t_{cp} + \left[ \frac{1}{\psi} \left( \frac{1}{\alpha_{1np}} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \frac{1}{\alpha_{1np}} \right] \cdot \frac{B_p}{H} \cdot (Q_6 + Q_n) \cdot 10^3 + 273 =$$

$$= 531,5 + \left[ \frac{1}{0,54} \left( \frac{1}{81,81} + \frac{1}{3699} \right) - \frac{1}{81,81} \right] \cdot \frac{7}{320} \cdot (641 + 0) \cdot 10^3 + 273 = 976\text{К}$$

Полученное расчетное значение абсолютной температуры загрязненной наружной поверхности труб пароперегревателя мало отличается от предварительно принятого и уточнения не требует.

А.19.51. Расчетный коэффициент теплоотдачи излучением продуктов сгорания

$$\alpha_n = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_3 + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{г.ср})^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_{з.пр}}{T_{г.ср}} \right)^4}{1 - \frac{T_{з.пр}}{T_{г.ср}}} =$$

$$= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,113 \cdot (1098)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{976}{1098} \right)^4}{1 - \frac{976}{1098}} = 25,81 \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.19.52. Коэффициент А для заданного топлива [2, п. 10.3.16]

$$A = 0,4.$$

А.19.53. Коэффициент теплоотдачи, с учетом излучения газовых объемов в межтрубном пространстве,

$$\alpha'_n = \alpha_n \cdot \left[ 1 + A \cdot \left( \frac{T'_r}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{1_{об}}{1_n} \right)^{0,07} \right] = 25,81 \cdot \left[ 1 + 0,4 \cdot \left( \frac{1123}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{0,5}{2,7} \right)^{0,07} \right] = 35,25 \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

А.19.54. Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке [2, п. 10.3.2]

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha'_n) = 1,0 \cdot (55,86 + 35,25) = 91,11 \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

А.19.55. Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,54 \cdot 91,11}{1 + \frac{91,11}{3699}} = 48,02 \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

					Лист
					162
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

ФЮРА 311085.001.ПЗ

А.19.56. Разность температур на входе в ступень

$$\Delta t' = \vartheta'_{\text{r}} - t' = 850 - 518 = 332 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

А.19.57. Разность температур на выходе из ступени

$$\Delta t'' = \vartheta''_{\text{r}} - t'' = 800 - 545 = 255 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

А.19.58. Температурный напор в ступени при прямотоке

$$\Delta t_{\text{прт}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{332 - 255}{\ln\left(\frac{332}{255}\right)} = 291,8^{\circ}\text{C}$$

А.19.59. Тепло, передаваемое ступени по уравнению теплопередачи,

$$Q_{\text{т}} = \frac{K \cdot \Delta t_{\text{прт}} \cdot H}{B_{\text{п}}} = \frac{48,02 \cdot 10^{-3} \cdot 291,8 \cdot 320}{7} = 641 \text{ кДж/кг}.$$

А.19.60. Невязка теплового баланса ступени

$$|\Delta Q| = \frac{(Q_{\delta} - Q_{\text{т}}) \cdot 100}{Q_{\delta}} = \frac{641 - 641}{641} \cdot 100 = 0\%$$

Полученная величина невязки теплового баланса ступени допустима, т. к. она более 0,5 %. Это означает, что установленная в заданном котле поверхность нагрева пароперегревателя обеспечивает перегрев пара до заданной температуры, равной 545 °С, и ее (поверхность нагрева) нет необходимости изменять для сжигания непроектного топлива.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		163

А.20 Расчет температуры точки росы дымовых газов и минимальной температуры стенки труб воздухоподогревателя

А.20.1. Парциальное давление водяных паров в дымовых газах

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{r}} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1 \cdot 0,087 = 0,0087 \text{ МПа.}$$

А.20.2. Температура конденсации водяных паров, при парциальном их давлении в дымовых газах,  $t_{\text{конд}} = 43,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

А.20.3. Разность температур точки росы дымовых газов и конденсации в них водяных паров

$$\Delta t_{\text{p}} = \frac{200 \cdot \sqrt[3]{S_{\text{пр}}^{\text{r}}}}{1,25^{a_{\text{yh}} \cdot A_{\text{пр}}^{\text{r}}}} = \frac{200 \cdot \sqrt[3]{0,02}}{1,25^{0,95 \cdot 0,73}} = 46,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

А.20.4. Температура точки росы дымовых газов

$$t_{\text{p}} = t_{\text{конд}} + \Delta t_{\text{p}} = 43,1 + 46,5 = 89,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.20.5. Коэффициент [3, рис. П.3]  $K_{\text{yx}}^{\text{min}} = 0,25$ .

А.20.6. Минимальная (по разверке) температура уходящих газов

$$\vartheta_{\text{yx}}^{\text{min}} = t'_{\text{в}} + K_{\text{yx}}^{\text{min}} \cdot (\vartheta'_{\text{r}} - t'_{\text{в}}) = 30 + 0,25 \cdot (273 - 30) = 90,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

А.20.7. Минимальная (по разверке) температура стенки труб воздухоподогревателя

$$t_{\text{ст}}^{\text{min}} = \frac{\alpha_1 \cdot \vartheta_{\text{yx}}^{\text{min}} \cdot \frac{d_{\text{BH}}}{d} + \alpha_2 \cdot t'_{\text{в}}}{\alpha_1 \cdot \frac{d_{\text{BH}}}{d} + \alpha_2} = \frac{37,64 \cdot 90,8 \cdot \frac{37}{40} + 49,73 \cdot 30}{37,64 \cdot \frac{37}{40} + 49,73} = 55 \text{ }^\circ\text{C}.$$

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		164

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ

#### Б.1. Определение приходной статьи баланса

Количество воздуха, подаваемого в сушильно-мельничную систему:

$$g_B = V_B^0 \cdot \alpha_1 \cdot \rho_B = 5,76 \cdot 0,2 \cdot 1,29 = 1,5 \text{ кг / кг},$$

где  $V_B^0$  - теоретически необходимое количество воздуха на 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $\rho_B = 1,29 \text{ м}^3 / \text{кг}$  - плотность воздуха;  $\alpha_1 = 0,2$  - коэффициент подачи пыле-воздушной смеси.

Б.1.1. Количество подмешиваемых газов должно обеспечивать снижение содержания кислорода в смеси до 17%. Это количество  $g_r$  может быть определено из уравнения  $V_{\text{перв}} \cdot 0,21 = (V_{\text{перв}} + V_r) \cdot 0,17$ . Отсюда  $V_r = 0,235 \cdot V_{\text{перв}}$ . Тогда, значение  $g_r$  может быть найдено по формуле

$$g_r = 0,235 \cdot \frac{g_B \cdot \rho_r}{\rho_B} = 0,235 \cdot \frac{1,5 \cdot 1,3}{1,29} = 0,355 \text{ кг / кг},$$

где  $V_r$  - объем подмешиваемых газов, м<sup>3</sup>/кг;  $\rho_r = 1,3 \text{ м}^3 / \text{кг}$  - плотность газов.

#### Б.1.2. Физическое тепло, внесенное сушильным агентом:

$$\begin{aligned} q_{\text{са}} &= g_B \cdot c_B \cdot t_B + g_r \cdot c_r \cdot t_r = \\ &= 1,5 \cdot 1,0566 \cdot 350 + 0,355 \cdot 1,08 \cdot 331 = 681,6 \text{ кДж / кг}, \end{aligned}$$

где  $c_B = 1,0566 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)}$  – теплоемкость воздуха;  $c_r = 1,08 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)}$  – теплоемкость воздуха.

#### Б.1.3. Физическое тепло присосанного воздуха:

$$\begin{aligned} q_{\text{прс}} &= K_{\text{прс}} \cdot (g_B + g_r) \cdot c_{\text{хв}} \cdot t_{\text{хв}} = \\ &= 0,2 \cdot (1,5 + 0,355) \cdot 1,0056 \cdot 30 = 11,2 \text{ кДж / кг}, \end{aligned}$$

где  $K_{\text{прс}}$  – коэффициент присоса в систему.

#### Б.1.4. Тепло, выделяющееся в результате работы размалывающих органов:

$$q_{\text{прс}} = K_{\text{мех}} \cdot \mathcal{E}_{\text{разм}} = 0,7 \cdot 90 = 63 \text{ кДж / кг},$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		165

где  $K_{\text{мех}}$  – коэффициент, учитывающий доля энергии, переходящей в тепло в процессе размола;  $\mathcal{E}_{\text{разм}}$  – удельный расход энергии на размол.

Б.1.5. Приходные статьи баланса:

$$q_{\text{прих}} = q_{\text{са}} + q_{\text{мех}} + q_{\text{прс}} = 681,6 + 11,2 + 63 = 755,8 \text{ кДж / кг.}$$

Б.2. Определение расходной статьи баланса

Б.2.1. Количество испаренной влаги на 1 кг сырого топлива:

$$\Delta W = \frac{W^{\text{р}} - W^{\text{пл}}}{100 - W^{\text{пл}}} = \frac{11,5 - 3,5}{100 - 3,5} = 0,083 \text{ кг / кг.}$$

Б.2.2. Тепло, затрачиваемое на испарение влаги:

$$\begin{aligned} q_{\text{исп}} &= \Delta W \cdot (2500 + 1,9 \cdot t_2 - 4,19 \cdot t_{\text{тл}}) = \\ &= 0,083 \cdot (2500 + 1,9 \cdot 70 - 4,19 \cdot 30) = 208,1 \text{ кДж / кг,} \end{aligned}$$

где  $t_2$  – температура сушильного агента в конце установки, °С;  $t_{\text{тл}}$  – температура сырого топлива, принимается равной температуре холодного воздуха, °С.

Б.2.3. Расход тепла с отработавшими в пылесистеме газами:

$$\begin{aligned} q_{\text{са}}'' &= (g_{\text{г}} \cdot c_{\text{г}} + g_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}}) \cdot t_2 \cdot (1 + K_{\text{прс}}) = \\ &= (0,355 \cdot 1,05 + 1,5 \cdot 1,009) \cdot 80 \cdot (1 + 0,2) = 181,1 \text{ кДж / кг.} \end{aligned}$$

Б.2.4. Тепло, затрачиваемое на подогрев топлива:

$$\begin{aligned} q_{\text{тл}} &= \frac{100 - W^{\text{р}}}{100} \cdot \left[ c_{\text{тл}}^{\text{с}} + \frac{W^{\text{пл}} \cdot 4,19}{100 - W^{\text{пл}}} \right] \cdot (t_{2\text{т}} - t_{\text{тл}}) = \\ &= \frac{100 - 11,5}{100} \cdot \left[ 1,1 + \frac{3,5 \cdot 4,19}{100 - 3,5} \right] \cdot (70 - 30) = 44,3 \text{ кДж / кг,} \end{aligned}$$

где  $c_{\text{тл}}^{\text{с}}$  - теплоемкость сухой массы топлива, кДж/(кг·град).

Б.2.5. Потери тепла от охлаждения установки в окружающую среду:

$$q_5 = \frac{Q_5^{\text{общ}}}{B_{\text{м}}} = \frac{36}{4,77} = 7,5 \text{ кДж / кг,}$$

где  $Q_5^{\text{общ}}$  - часовая потеря тепла на охлаждение установки, кВт.

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		166

$$V_M = K_{\text{зап}} \cdot \frac{V}{n_M} = 1,35 \cdot \frac{7,07}{2} = 4,77 \text{ кг / с},$$

где  $n_M$  – количество мельниц, шт;  $V$  – полный расход топлива на котел, кг/с;

$K_{\text{зап}}$  – коэффициент запаса по производительности мельницы.

Б.2.6. Расходные статьи баланса:

$$\begin{aligned} q_{\text{расх}} &= q_{\text{исп}} + q_{\text{са}}'' + q_{\text{тл}} + q_5 = \\ &= 208,1 + 181,1 + 44,3 + 7,5 = 441 \text{ кДж / кг}. \end{aligned}$$

Расходные статьи баланса получились меньше приходной статьи, следовательно, можно снижать объем подаваемого воздуха в сушильно-мельничное устройство, что обеспечит снижение содержания кислорода в смеси ниже 17%.

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
						167
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### РАСЧЕТ ТРАКТА РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Температура отбираемых газов за второй ступенью воздухоподогревателя (из теплового расчета котла):

$$t_r = 331^\circ\text{C}.$$

Объем отбираемых газов (на один дымосос):

$$V_{\text{сек}}^r = \frac{q_r \cdot B_p^M \cdot (t_r + 273)}{\gamma_0^2 \cdot 3,6 \cdot 273} = \frac{0,59 \cdot 19,8 \cdot (331 + 273)}{1,313 \cdot 3,6 \cdot 273} = 4,96 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Самотяга в месте отбора газов ( $t_r = 331^\circ\text{C}$ , высота  $h = 11,55 \text{ м}$ ):

$$\Delta h_c = h'_c \cdot h = 0,67 \cdot 11,55 = 7,7 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

Разрежение в месте отбора:

$$\begin{aligned} h_c &= \Delta h_T + \sum H_{I-V} \cdot \mu_p + \Delta h_c = \\ &= 2 + (1,2 + 16,7 + 11,3 + 16,3 + 29,8) \cdot 1,004 + 7,7 = 85,3 \text{ кг} / \text{м}^2. \end{aligned}$$

#### В.1 Всасывающий тракт

В.1.1 Симметричный собирающий тройник ( $\alpha = 90^\circ$ ).

Сечения:

$$F_0 = a \cdot b = 0,5 \cdot 0,4 = 0,2 \text{ м}^2,$$

$$F_c = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,704^2 = 0,389 \text{ м}^2.$$

Скорости газов:

$$W_0 = \frac{V_{\text{сек}}}{2 \cdot F_0} = \frac{4,96}{0,4} = 12,4 \text{ м}^2,$$

$$W_c = \frac{V_{\text{сек}}}{F_c} = \frac{4,96}{0,389} = 12,76 \text{ м}^2.$$

Коэффициент сопротивления ( $\frac{W_0}{W_c} = \frac{12,4}{12,76} = 0,972$ ;  $\frac{F_0}{F_c} = \frac{0,2}{0,389} = 0,51$ ):

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		168

из графика 20 [3]  $\zeta = 2,1$ .

Сопротивление тройника:

$$\Delta h_1 = \zeta \cdot H_q = 2,1 \cdot 5 = 10,5 \text{ кг / м}^2.$$

В.1.2 Три плавных поворота на  $90^\circ$ .

Сечение:  $F = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,704^2 = 0,389 \text{ м}^2$ .

Скорость газов:

$$W = \frac{V_{\text{сек}}}{F} = \frac{4,96}{0,389} = 12,76 \text{ м}^2.$$

Коэффициент сопротивления (нормы п. 2-43):

$$\zeta = 0,4.$$

Сопротивление поворотов:

$$\Delta h_2 = 3 \cdot \zeta \cdot H_q = 3 \cdot 0,4 \cdot 5,3 = 6,36 \text{ кг / м}^2.$$

В.1.3 Переход с круглого сечения на квадратное.

Сечения:

$$F_1 = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,704^2 = 0,389 \text{ м}^2,$$

$$F_2 = a \cdot b = 0,785 \cdot 0,365 = 0,286 \text{ м}^2,$$

Скорость газов в сечении  $F_2$ :

$$W = \frac{V_{\text{сек}}}{F_2} = \frac{4,96}{0,286} = 17,36 \text{ м}^2.$$

Коэффициент сопротивления (из графика 7 [3]):

$$\zeta = 0,1.$$

Сопротивление перехода:

$$\Delta h_3 = \zeta \cdot H_q = 0,1 \cdot 9,9 = 1,0 \text{ кг / м}^2.$$

В.1.4 Циклон НИИОГАЗ Ø1450.

Сечение:

$$F = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 1,45^2 = 1,65 \text{ м}^2,$$

Скорость газов в циклоне:

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		169

$$W = \frac{V_{\text{сек}}}{F} = \frac{4,96}{1,65} = 3,01 \text{ м}^2.$$

Динамический напор:

$$H_q = \frac{\gamma_0^2 \cdot W^2}{2q} \frac{273}{273 + t_r} = \frac{1,313 \cdot 3,01^2}{19,62} \frac{273}{548} = 0,302 \text{ кг / м}^2.$$

Коэффициент сопротивления:

$$\zeta = 150.$$

Сопротивление циклона:

$$\Delta h_4 = \zeta \cdot H_q = 150 \cdot 0,302 = 45,3 \text{ кг / м}^2.$$

В.1.5 Изменение сечения (диффузор  $l = 0,5$  м).

Сечение выхода:

$$F_{\text{вых}} = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,61^2 = 0,292 \text{ м}^2.$$

Коэффициент полноты удара ( $\alpha = 11^\circ$ ):

$$\text{из графика 9 } \varphi_0 = 0,25.$$

Коэффициент сопротивления выхода ( $\frac{F}{F_{\text{вых}}} = \frac{0,292}{0,389} = 0,75$ ):

$$\text{из графика 8 [3] } \zeta_{\text{вых}} = 0,07.$$

Скорость:

$$W = \frac{V_{\text{сек}}}{F} = \frac{4,96}{0,292} = 17 \text{ м}^2.$$

Коэффициент сопротивления диффузора:

$$\zeta_{\text{дфр}} = f_p \cdot \zeta_{\text{вых}} = 0,25 \cdot 0,07 = 0,0175.$$

Сопротивление изменения сечения:

$$\Delta h_5 = \zeta_{\text{дфр}} \cdot H_q = 0,0175 \cdot 9,4 = 0,16 \text{ кг / м}^2.$$

В.1.6 Два плавных поворота на  $90^\circ$ .

Сечение:

$$F = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,704^2 = 0,389 \text{ м}^2.$$

Скорость:

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		170

$$W = \frac{V_{\text{сек}}}{F} = \frac{4,96}{0,389} = 12,76 \text{ м}^2.$$

Коэффициент сопротивления поворота (нормы п. 2-43):

$$\zeta = 0,4.$$

Сопротивление поворотов:

$$\Delta h_6 = 2 \cdot \zeta \cdot H_q = 2 \cdot 0,4 \cdot 5,3 = 4,24 \text{ кг / м}^2.$$

В.1.7 Сопротивление трения всасывающего тракта.

Длина тракта:

$$l = 34,85 \text{ м}.$$

Эквивалентный диаметр:

$$d = 0,704 \text{ м}.$$

Скорость газов:

$$W = 12,76 \text{ м}^2.$$

Динамический напор (график 4):

$$H_q = 5,3 \text{ кг / м}^2.$$

Коэффициент сопротивления трения:

$$\zeta = 0,02.$$

Сопротивление трения:

$$\Delta h_7 = \lambda \frac{l}{d_{\text{экв}}} H_q = 0,02 \cdot \frac{34,85}{0,704} \cdot 5,3 = 5,25 \text{ кг / м}^2.$$

Сопротивление всасывающего тракта ( $\mu_\gamma = 1,004$ ):

$$\Delta H_{\text{всас}} = \sum \Delta h_{1-7} \cdot \mu_\gamma = 72,8 \cdot 1,004 = 73,1 \text{ кг / м}^2.$$

## В.2 Нагнетательный тракт

В.2.1 Диффузор за вентилятором.

Сечения:

$$F_1 = a \cdot b = 0,56 \cdot 0,42 = 0,236 \text{ м}^2,$$

$$F_2 = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,704^2 = 0,389 \text{ м}^2.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
						171
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Скорость газов:

$$W_1 = \frac{V_r}{F_1} = \frac{4,96}{0,236} = 21 \text{ м}^2.$$

Динамический напор (график 4):

$$H_q = 6,3 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

Коэффициент сопротивления ( $\frac{F_2}{F_1} = 1,64$ ;  $\frac{1}{b_1} = \frac{0,75}{0,42} = 1,785$ ):

из графика 11 [3]  $\zeta = 0,085$ .

Сопротивление диффузора:

$$\Delta h_1 = \zeta \cdot H_q = 0,08 \cdot 14,5 = 1,2 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

В.2.2 Два плавных поворота на  $90^\circ$ .

Сечение:

$$F = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,704^2 = 0,389 \text{ м}^2.$$

Скорость:

$$W = \frac{V_{\text{сек}}}{F} = \frac{4,96}{0,389} = 12,76 \text{ м}^2.$$

Коэффициент сопротивления поворота (нормы п. 2-43):

$$\zeta = 0,4.$$

Сопротивление поворотов:

$$\Delta h_2 = 2 \cdot \zeta \cdot H_q = 2 \cdot 0,4 \cdot 5,3 = 4,24 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

В.2.3 Резкие повороты на  $5^\circ$  - 1 шт., на  $8^\circ$  - 2 шт., на  $12^\circ$  - 1 шт.

Сечение:

$$F = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,704^2 = 0,389 \text{ м}^2.$$

Скорость:

$$W = \frac{V_{\text{сек}}}{F} = \frac{4,96}{0,389} = 12,76 \text{ м}^2.$$

Динамический напор (график 4):

$$H_q = 5,3 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		172

Суммарный коэффициент сопротивления:

$$\zeta = 1,4 \cdot \sum B_{1-4} = 1,4 \cdot (0,01 + 0,02 + 0,02 + 0,03) = 0,112.$$

Сопротивление поворотов:

$$\Delta h_3 = \zeta \cdot H_q = 0,112 \cdot 5,3 = 0,6 \text{ кг / м}^2.$$

В.2.4 Плавный поворот на 20°.

Сечение:

$$F = 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,704^2 = 0,389 \text{ м}^2.$$

Скорость:

$$W = \frac{V_{\text{сек}}}{F} = \frac{4,96}{0,389} = 12,76 \text{ м}^2.$$

Коэффициент сопротивления поворота ( $\frac{R}{B} = \frac{1250}{704} = 1,8$ ):

$$\zeta = K \cdot \Delta \zeta_0 \cdot B \cdot C = 0,2 \cdot 0,3 \cdot 1 = 0,06.$$

Сопротивление поворотов:

$$\Delta h_4 = \zeta \cdot H_q = 0,06 \cdot 5,3 = 0,3 \text{ кг / м}^2.$$

В.2.5 Два шибера Ø704мм.

Динамический напор:

$$H_q = 5,3 \text{ кг / м}^2.$$

Разрежение перед мельницей (из расчета пылеприготовления):

$$S'_m = 20 \text{ кг / м}^2.$$

Общее сопротивление тракта рециркуляции:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{общ}} &= (h_c + \Delta H_{\text{всас}} + \Delta H_{\text{нагн}}) \frac{760}{740} - S'_m = \\ &= (85,3 + 73,1 + 25,4) \frac{760}{740} - 20 = 168,5 \text{ кг / м}^2. \end{aligned}$$

### В.3 Выбор дымососа

Расчетная производительность дымососа с запасом 10%:

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		173

$$Q_p = \frac{760}{740} \cdot 1,1 \cdot V_{\text{сек}}^r \cdot 3600 = \frac{760}{740} \cdot 1,1 \cdot 4,96 \cdot 3600 = 20100 \text{ м}^3 / \text{ час.}$$

Расчетное сопротивление с запасом 20%:

$$H_p = 1,2 \cdot \Delta H_{\text{общ}} = 1,2 \cdot 168,5 = 208 \text{ кг} / \text{ м}^2.$$

Поправочный коэффициент:

$$K_\gamma = \frac{1}{\mu_\gamma} \frac{\tau_q}{\tau_{\text{хар}}} = \frac{1}{1,004} \frac{273 + 331}{273 + 400} = 0,832.$$

Приведенный напор:

$$H_{\text{пр}} = K_\gamma \cdot H_p = 0,832 \cdot 208 = 168 \text{ кг} / \text{ м}^2.$$

Выбираем тип дымососа ВГДН-11,2.

Число оборотов  $n = 1500$  об/мин.

В.3.1 Расчетный режим.

Производительность  $Q_p = 20100 \text{ м}^3 / \text{ час.}$

Напор:  $H_p = 208 \text{ кг} / \text{ м}^2.$

Коэффициент сопротивления:  $\zeta = 0,1.$

Сопротивление шиберов:

$$\Delta h_5 = 2 \cdot \zeta \cdot H_q = 2 \cdot 0,1 \cdot 5,3 = 1,1 \text{ кг} / \text{ м}^2.$$

В.3.2 Трение.

Длина участка:  $l = 40,4 \text{ м.}$

Сопротивление трения:

$$\Delta h_6 = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot H_q = 0,02 \cdot \frac{40,4}{0,704} \cdot 5,3 = 6,1 \text{ кг} / \text{ м}^2.$$

В.3.3 Собирающий тройник  $\alpha = 90^\circ.$

Сечения:

$$F_0 = F_c = 0,785 \cdot d_1^2 = 0,785 \cdot 1,01^2 = 0,8 \text{ м}^2,$$

$$F_r = 0,785 \cdot d_1^2 = 0,785 \cdot 0,704^2 = 0,389 \text{ м}^2.$$

Объем смеси, проходящей через тройник:

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		174

$$V_{\text{см}} = \left( \frac{q_{\Gamma}}{\gamma_0^{\Gamma}} + \frac{q_{\Gamma\text{В}}}{\gamma_0^{\text{В}}} \right) \frac{B_{\text{п}}^{\text{М}}}{3,6} \frac{273 + t_1}{273} =$$

$$= \left( \frac{0,59}{1,313} + \frac{1,05}{1,285} \right) \frac{19,8}{3,6} \frac{273 + 285}{273} = 14,21 \text{ м}^3 / \text{сек.}$$

Скорость смеси:

$$W = \frac{V_{\text{см}}}{F_{\text{с}}} = \frac{14,21}{0,8} = 17,8 \text{ м}^2.$$

Коэффициент сопротивления ( $\frac{F_{\Gamma}}{F_{\text{с}}} = \frac{0,389}{0,8} = 0,486$ ;  $\frac{Q_{\text{б}}}{Q_{\text{с}}} = \frac{4,06}{14,21} = 0,339$ ):

из графика 17 [3]  $\zeta_{\text{сб}} = 0,65$ .

Динамический напор (график 4):

$$H_{\text{q}} = 10,2 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

Сопротивление тройника:

$$\Delta h_7 = \zeta_{\text{сб}} \cdot H_{\text{q}} = 6,6 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

В.3.4 Шибер Ø1010.

Коэффициент сопротивления:  $\zeta = 0,1$ .

Сопротивление шибера:

$$\Delta h_8 = \zeta \cdot H_{\text{q}} = 0,1 \cdot 10,2 = 1,0 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

В.3.5 Плавный поворот на 90°.

Коэффициент сопротивления (нормы п. 2-43):  $\zeta = 0,4$ .

Сопротивление поворота:

$$\Delta h_9 = \zeta \cdot H_{\text{q}} = 0,4 \cdot 10,2 = 4,1 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

В.3.6 Сопротивление трения.

Длина участка:  $l = 5,5 \text{ м}$ .

Коэффициент сопротивления:  $\lambda = 0,02$ .

Сопротивление трения:

$$\Delta h_{10} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot H_{\text{q}} = 0,02 \cdot \frac{5,5}{1,01} \cdot 10,2 = 1,1 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

					<b>ФЮРА 311085.001.ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		175

Сопротивление нагнетательного тракта ( $\mu_\gamma = 1,004$ ):

$$\Delta H_{\text{наг}} = \sum h_{1-10} \cdot \mu_\gamma = 25,34 \cdot 1,004 = 25,4 \text{ кг / м}^2.$$

КПД  $\eta = 70\%$ .

$$\text{Мощность на валу: } N_b = \frac{Q_p \cdot H_p}{3670 \cdot \eta} = \frac{20100 \cdot 208}{3670 \cdot 70} = 15,8 \text{ кВт.}$$

Мощность электродвигателя:  $N_n = 1,15 \cdot N_b = 1,15 \cdot 15,8 = 18,2 \text{ кВт.}$

Запасы по производительности  $\beta_1 = 1,1$ .

Запасы по напору  $\beta_2 = 1,2$ .

Запасы по мощности  $\beta_3 = 1,15$ .

					ФЮРА 311085.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		176

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 – Капитальные затраты

Перевод котлов БКЗ-210-140 на сжигание непроектного топлива	
Наименование	Стоимость, млн.руб. (без НДС)
1. Подготовка площадки строительства	2,1
2. Реконструкция существующего оборудования	80
2.1 Установка дымососов инертных газов	35
2.2 Установка циклонов	15
2.3 Газоходы	20
2.4 Модернизация систем пожаротушения	10
3. АСУ ТП	1
4. Строительно-монтажные работы и материалы	10
5. Инжиниринговые работы и услуги	10
Всего по п.1-5	102,1
Прочие (10%)	10,2
ИТОГО (без НДС)	112,3
Итого (с НДС)	127

Таблица Г.2 – Сокращенная калькуляция себестоимости энергии ТЭЦ при сжигании проектного топлива

	Элементы затрат в млн. руб.					Распределение затрат на			
	Топливо	Зпл	Амортизация и ремонт	Прочие	ВСЕГО	Электроэнергию		Теплоэнергию	
						в млн. руб	в %	в млн. руб	в %
Топливо-транспортный и котельный цехи	2542	89,7	43,7	-	2675,3	1747,1	65,3	928,2	34,7
Машинный и электрический цехи	-	64,1	34	-	98	98	100	-	-
Всего по пп.1+2	2542	153,7	77,6	-	2773,3	1845,1	66,5	928,2	33,5
Общестанционные расходы	-	59,8	19,4	142,6	221,8	147,6	66,5	74,2	33,5
Итого затрат по пп. 3+4	2542	213,5	97	142,6	2995,1	1992,7		1002,4	
Распределение затрат:									
Коэффициент разности $K_{\text{разн}}$ на эл.энергию	0,653	0,734	0,734	0,734					
на электроэнергию	1660,1	156,7	71,2	104,7	1992,7				
на теплоэнергию	881,9	56,8	25,8	37,9	1002,4				
Себестоимость единицы:									
$\Delta_{\text{отп}}$ , МВт.ч/год	2737000	2737000	2737000	2737000					
электроэнергии руб/кВт.ч	0,61	0,057	0,026	0,038	0,728				
$Q_{\text{отп}}$ , Гкал/год	1704000	1704000	1704000	1704000					
теплоэнергии руб/Гкал	517,6	33,3	15,1	22,3	588,3				

ФЮРА 311085.001.ПЗ

Изм.  
Лист  
№ докум.  
Подпись  
Дата

Лист  
178

Таблица Г.3 – Сокращенная калькуляция себестоимости энергии ТЭЦ при сжигании непроектного топлива

	Элементы затрат в млн. руб.					Распределение затрат на			
	Топливо	Зпл	Амортизация и ремонт	Прочие	ВСЕГО	Электроэнергию		Теплоэнергию	
						в млн. руб	в %	в млн. руб	в %
Топливо-транспортный и котельный цехи	2109	89,7	44,8	-	2243,4	1450,4	64,7	793,0	35,3
Машинный и электрический цехи	-	64,1	34,8	-	98,9	98,9	100	-	-
Всего по пп.1+2	2109	153,7	79,6	-	2342,3	1549,3	66,1	793	33,9
Общестанционные расходы	-	59,8	19,9	121,1	200,8	132,8	66,1	68	33,9
Итого затрат по пп. 3+4	2109	213,5	99,5	121,1	2543,1	1682,1		861	
Распределение затрат:									
Коэффициент разности $K_{\text{разн}}$ на эл.энергию	0,647	0,734	0,734	0,734					
на электроэнергию	1363,5	156,7	73	88,9	1682,1				
на теплоэнергию	745,5	56,8	26,5	32,2	861				
Себестоимость единицы:									
$\Delta_{\text{отп}}$ , МВт.ч/год	2737000	2737000	2737000	2737000					
электроэнергии руб/кВт.ч	0,50	0,06	0,03	0,03	0,615				
$Q_{\text{отп}}$ , Гкал/год	1704000	1704000	1704000	1704000					
теплоэнергии руб/Гкал	437,5	33,3	15,5	18,9	505,3				

ФЮРА 311085.001.ПЗ

Таблица Г.4 – Показатели работы ТЭЦ при сжигании проектного и непроеKTного топлива

Показатель	Размерность	Проектное топливо	Непроектное топливо
Номинальная мощность станции	МВт	535	535
Годовой расход топлива на производство ЭЭ	тнт/год	1 336 000	1 300 000
Годовой расход топлива на производство ТЭ	тнт/год	600 000	589 000
Годовые издержки на топливо на производство ЭЭ	руб/год	1754·10 <sup>6</sup>	1453·10 <sup>6</sup>
Годовые издержки на топливо на производство ТЭ	руб/год	788·10 <sup>6</sup>	656·10 <sup>6</sup>
Амортизация	руб/год	64·10 <sup>6</sup>	65,5·10 <sup>6</sup>
Заработная плата	руб/год	164,2·10 <sup>6</sup>	164,2·10 <sup>6</sup>
Социальные отчисления	руб/год	49,3·10 <sup>6</sup>	49,3·10 <sup>6</sup>
Ремонт	руб/год	33·10 <sup>6</sup>	34·10 <sup>6</sup>
Прочие издержки	руб/год	142,6·10 <sup>6</sup>	121,1·10 <sup>6</sup>
Отпуск с шин ЭЭ	млн.кВт·ч	2737	2737
Отпуск тепла потребителям	тыс. Гкал	1704	1704
Себестоимость ЭЭ	руб/кВт·ч	0,728	0,615
Себестоимость ТЭ	руб/Гкал	588,3	505,3

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д – ЗАКАЗНАЯ СПЕЦИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

Позиция	Наименование, техническая характеристика приборов и средств автоматизации, завод – изготовитель	Тип и марка прибора	Кол-во, шт
1	2	3	4
1а	Сопло камерное сварное. Подольский машиностроительный завод.	СКС-500-325	1
1б	Сосуд конденсационный. АО "Манометр", г. Москва	СК-40-1-Б	1
1в	Преобразователь разности давления, верхний предел измерения 16 МПа, рабочее давление 25 МПа, предел основной допустимой погрешности $\pm 0,25\%$ , выходной сигнал 0 – 5 мА, Завод изготовитель ПО «Теплоконтроль» г. Казань.	Сапфир – 22ДД-Вн 2460 – 02- УХ/13.1 – 0,25/16МПа	1
1г	Блок питания, стабилизированное напряжение 36 В постоянного тока климатическим исполнением УХЛ. АО "Манометр", г. Москва	БП36 – УХЛ – РИБЮ 435111.001 ТУ	1
2а	Сопло камерное сварное. Подольский машиностроительный завод.	СКС-500-325	1
2б	Сосуд уравнительный АО "Манометр", г. Москва	СУ – 40 – Б – ТУ25 – 7439.0018 – 90	1
2в	Преобразователь разности давления, верхний предел измерения 16 МПа, рабочее давление 25 МПа, предел основной допустимой погрешности $\pm 0,25\%$ , выходной сигнал 0 – 5 мА, Завод изготовитель ПО «Теплоконтроль» г. Казань.	Сапфир – 22ДД-Вн 2460 – 02- УХ/13.1 – 0,25/16МПа	1
2г	Блок питания, стабилизированное напряжение 36 В постоянного тока климатическим исполнением УХЛ. АО "Манометр", г. Москва	БП36 – УХЛ – РИБЮ 435111.001 ТУ	1
ФЮРА 4.21000.008 СО1			
Исполн.	Матвиевский А.С.	Станд	Листов
Провер.	Артошенко Ю.К.	ТРП	1
		ИИТПУ ИДО Группа 3-6301	

1	2	3	4
3а 260мм	Сосуд уравнильный; условное давление 25 МПа; сталь — 12Х18Н10Т ПКФ «Веспер», г. Москва	СЧ-25-2-Б Т425-7439.0018-90	1
3б	Преобразователь разности давления, верхний предел измерения 16 МПа, рабочее давление 25 МПа, предел основной допустимой погрешности ± 0,25 %, выходной сигнал 0 – 5 мА, Завод изготовитель ПО «Теплоконтроль» г. Казань.	Сапфир – 22ДД-Вн 2460 – 02- УХ/13.1 – 0,25/16МПа	1
3в	Блок питания, стабилизированное напряжение 36 В постоянного тока климатическим исполнением УХЛ. АО «Манометр», г. Москва	БП36 – УХЛ – РИБЮ 435111.001 ТУ	1
3г	Программируемый логический контроллер, напряжение питания –220 В, потребляемая мощность – не более 100 ВА.	ELSY-TM	1
3д	Задатчик ручной. Установка задания в диапазоне 0–100%, преобразование сигналов. ОАО «ЗЭИМ», г. Чебоксары.	РЗД-22	1
3е	Блок ручного управления ОАО «ЗЭИМ», г. Чебоксары.	БРУ-32	1
3ж	Пускатель бесконтактный реверсивный. Входной сигнал–24 В постоянного тока. Максимальный коммутируемый ток 4 А. Потребляемая мощность не более 5 Вт. ОАО «ЗЭИМ», г. Чебоксары.	ПБР-2М1	1
3з	Механизм исполнительный электрический однооборотный постоянной скорости, напряжение питания –220/380 В, 50 Гц. ОАО «ЗЭИМ», г. Чебоксары.	МЭО-40/10	1
4а	Указатель положения дистанционный, напряжение питания 220 В, потребляемая мощность 5 Вт. ОАО «ЗЭИМ», г. Чебоксары.	ДУП-М	1
ФЮРА 421000.008 СО1			Лист 2