

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

Инженерная школа энергетике

Специальность: **14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг**

НОЦ И.Н.Бутакова

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

Тема работы
<b>ПРОЕКТ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТЬЮ 1200 МВт</b>

УДК 621.311.25:621.039.577

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5041	Федосеева Елена Юрьевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	Д.В. Гвоздяков	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	В.А. Маланина	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	А.Г. Дашковский	к.т.н., доцент		

По разделу «Автоматизация технологических процессов и производств»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	М.Д. Кац	к.ф.-м.н., доцент		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	М.А.Вагнер	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг»	Воробьев А.В.	к.т.н., доцент		

Томск – 2020 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<b>Универсальные компетенции</b>
P1	Использовать методологические основы современной картины мира для научного познания и творчества, выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в профессиональной деятельности
P2	Анализировать социально-значимые процессы и явления, экономические проблемы и общественные процессы, ответственно участвовать в общественно-политической жизни, применять методы социального взаимодействия на основе принятых моральных и правовых норм
P3	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе на иностранном языке, разрабатывать документацию, презентовать и публично защищать результаты, владеть методами пропаганды научных достижений
P4	Использовать системный подход в профессиональной деятельности, ставить цели и выбирать пути их достижения, обобщать, анализировать, критически осмысливать, систематизировать
P5	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию, развитию социальных и профессиональных компетенций, использовать полученные знания для обучения и воспитания новых кадров
P6	К достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности и должного уровня безопасности жизнедеятельности, в том числе, защиты персонала и населения от последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий
P7	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе, многонациональном, принимать ответственность за свои решения, в том числе, нестандартные, управлять коллективом, находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях
P8	Использовать информационные технологии для работы с информацией, управления ею и создания новой информации; работать с информацией в глобальных компьютерных сетях, осознавать и соблюдать основные требования информационной безопасности
	<b>Профессиональные компетенции</b>
P9	Понимать значимость своей специальности, стремиться к ответственному отношению к своей трудовой деятельности, демонстрировать особые компетенции, связанные с уникальностью задач, объектов в области проектирования и эксплуатации АС

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P10	Использовать глубокие математические, естественнонаучные знания в профессиональной деятельности с применением математического моделирования объектов и процессов в области проектирования и эксплуатации АС
P11	Проводить <i>инновационные</i> научные исследования систем и оборудования атомных электрических станций и ядерных энергетических установок, участвовать во внедрении результатов исследований
P12	Анализировать и использовать научно-техническую информацию, формулировать цели проекта, ставить и решать инновационные задачи <i>комплексного</i> инженерного анализа в области проектирования и эксплуатации АС
P13	Выбирать, создавать и использовать оборудование атомных электрических станций и ядерных энергетических установок, средства измерения тепловых физических параметров и автоматизированного управления, защиты и контроля технологических процессов
P14	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок систем и оборудования АС и ядерных энергетических установок, готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений, выполнять <i>инновационные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, современных методов проектирования для достижения оптимальных результатов с учетом принципов и средств обеспечения ядерной и радиационной безопасности
P15	Разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы в области проектирования АС
P16	Анализировать нейтронно-физические, технологические процессы и алгоритмы контроля, диагностики, управления и защиты, проводить нейтронно-физические, теплогидравлические и прочностные расчеты оборудования АС и его элементов в стационарных и нестационарных режимах работы
P17	Делать оценку ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации ядерных энергетических установок, а также при обращении с ядерным топливом и другими отходами
P18	Применять основы обеспечения оптимальных режимов работы ядерного реактора, тепломеханического оборудования и энергоблока АС в целом при пуске, останове, работе на мощности и переходе с одного уровня мощности на другой с соблюдением требований безопасности, выполнять типовые операции по управлению реактором и энергоблоком на функционально-аналитическом тренажере
P19	Анализировать технологии монтажа, ремонта и демонтажа оборудования АС применительно к условиям сооружения, эксплуатации и снятия с эксплуатации энергоблоков АС

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P20	Осуществлять и анализировать технологическую деятельность как объект управления, организовывать рабочие места, обеспечивать их техническое оснащение, размещать технологическое оборудование, контролировать соблюдение технологической дисциплины и обслуживать технологическое оборудование, исследовать причины его неисправностей, принимать меры по их устранению
P21	Составлять техническую документацию и организовывать экспертизу технической документации, составлять установленную отчетность по утвержденным формам, управлять малыми коллективами исполнителей, планировать работу персонала и фонды оплаты труда
P22	Выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов ядерных энергетических установок, проводить анализ производственных затрат на обеспечение необходимого качества продукции
P23	Составлять и использовать тепловые схемы и математические модели процессов и аппаратов ядерно-энергетических и тепломеханических установок различных типов АС, готовить исходные данные для расчета тепловых схем
P24	Проводить физические эксперименты на этапах физического и энергетического пуска энергоблока с целью определения нейтронно-физических параметров реакторной установки и АС в целом
P25	Применять на практике принципы организации эксплуатации современного оборудования и приборов АС, понимать принципиальные особенности стационарных и переходных режимов реакторных установок и энергоблоков и причины накладываемых ограничений при нормальной эксплуатации, при её нарушениях, при ремонте и перегрузках

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

---

Инженерная школа энергетики

Специальность: **14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг**  
НОЦ И.Н.Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
А.В. Воробьев

\_\_\_\_\_

(Подпись)

\_\_\_\_\_

(Дата)

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

В форме:

<b>дипломного проекта</b>
---------------------------

(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
<b>5041</b>	<b>Федосеевой Елене Юрьевне</b>

Тема работы:

<b>ПРОЕКТ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТЬЮ 1200 МВт</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	09.01.2020, 9-46/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:	<b>28 января 2020 года</b>
--	----------------------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Целью работы является проект энергоблока АЭС электрической мощностью 1200 МВт. В качестве исходных данных для расчета является типовая проект В-392М.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Расчет реактора;</li><li>2. Расчет парогенератора;</li><li>3. Расчет тепловой схемы на конденсационный режим;</li><li>4. Расчет рассеивания выбросов АЭС;</li><li>5. Автоматизированная система управления температурой свежего пара после РОУ;</li><li>6. Социальная ответственность;</li><li>7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li><li>8. Заключение</li></ol>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Чертеж общего вида ядерного реактора;</li><li>2. Чертеж общего вида парогенератора;</li><li>3. Технологическая схема энергоблока ВВЭР-1200;</li></ol>

	4. Компановка главного здания АЭС; 5. Функциональная схема автоматического регулирования и контроля температуры свежего пара после РОУ
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
<b>Финансовый менеджмент</b>	А.Г. Дашковский. Доцент ООД ШБИП
<b>Социальная ответственность</b>	В.А. Маланина. Доцент ОСГН ШБИП
<b>Автоматизация технологических процессов</b>	М.Д. Кац. Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	28 июня 2019 года
---	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	Д.В. Гвоздяков	к.т.н., доцент		28.06.19

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5041	Федосеева Елена Юрьевна		28.06.19

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5041	Федосеевой Елене Юрьевне

<b>Инженерная школа энергетики</b>		<b>Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова</b>	
<b>Уровень образования</b>	<b>Специалист</b>	<b>Направление/специальность</b>	<b>14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг</b>

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. Стоимость расходных материалов; 2. Стоимость расхода электроэнергии; 3. Норматив заработной платы
4. Нормы и нормативы расходования ресурсов	1. Тариф на электроэнергию; 2. Коэффициенты для расчета заработной платы.
5. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	1. Отчисления во внебюджетные фонды (30%); 2. Расчет дополнительной заработной платы (12%)

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

1. Планирование и формирование бюджета научных исследований	1. Структура работ в рамках научного исследования; 2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; 3. Бюджет научно – исследовательской работы (НИР)
---	--

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. График проведения и бюджет НИР; 2. Диаграмма Ганта; 3. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ
---

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.10.19
---	----------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	В.А. Маланина	к.э.н., доцент		01.10.19

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5041	Е.Ю. Федосеева		01.10.19

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5041	Федосеевой Елене Юрьевне

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ОЭЭ</b>
<b>Уровень образования</b>	Специалист	<b>НОЦ им. И.Н.Бутакова</b>	Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Описание рабочего места	Рабочее место оператора турбинного отделения на блочном пульте управления
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Федеральный закон “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” от 28.12.2013 г. №123</li> <li>– Федеральный закон “О специальной оценке условий труда” от 28.12.2013 г. №426</li> </ul>

<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды	Перечень ВФ: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Параметры МК</li> <li>– Монотонность труда</li> <li>– Освещение</li> <li>– Электромагнитное излучение</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды	– В каких случаях может произойти поражение электрическим током (источники)
3. Охрана окружающей среды	– Анализ воздействия на атмосферу
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	– Пожарная безопасность (пожар в БПУ)
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Рассмотрены основные организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны;</li> <li>– Социальное страхование работников</li> </ul>

<b>Перечень графического материала:</b>	
– При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Схема обработки и удаления газообразных продуктов на АЭС с реактором типа ВВЭР;</li> <li>– План эвакуации</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	28.10.2019
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Дашковский Анатолий Григорьевич	к.т.н., доцент		28.10.2019

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5041	Федосеева Елена Юрьевна		28.10.2019

## Реферат

Дипломный проект состоит из 162 страниц, 23 рисунка, 34 таблицы, 8 приложений, 5 листов графического материала.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были использованы следующие программные средства: Microsoft Office 2013, Mathcad 15.

Ключевые слова: энергоблок АЭС, реактор, парогенератор, тепловая схема, тепловая мощность.

Объектом исследования является энергоблок АЭС электрической мощностью 1200 МВт.

Цель работы – проектирование энергоблока атомной станции электрической мощности 1200 МВт, подбор теплотехнического оборудования.

В процессе разработки провели выбор и обоснование конструктивной схемы реактора и парогенератора. Проводились расчеты для определения основных характеристик активной зоны, парогенератора. Спроектировали тепловую схему на заданные параметры. Провели расчет принципиальной схемы на конденсационный режим.

В результате исследования спроектирован энергоблок АЭС электрической мощности 1200 МВт.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

## Список принятых сокращений

АЗ – активная зона;  
АСР – автоматизированная система регулирования;  
АЭС – атомная электрическая станция;  
БОУ – блочная обессоливающая установка;  
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;  
ГЦК – главный циркулирующий контур;  
ГЦН – главный циркулирующий насос;  
ДП – деаэратор питательной воды;  
ИМ – исполнительный механизм;  
КПД – коэффициент полезного действия;  
КУ – конденсатная установка;  
КЭН – конденсатный электрический насос;  
МОТО – машинист обходчик турбинного отделения;  
ПВ – питательная вода;  
ПВД – подогреватель высокого давления;  
ПГ – парогенератор;  
ПНД – подогреватель низкого давления;  
ПТУ – паротурбинная установка;  
РБГ – радиоактивные благородные газы;  
РБМК – реактор большой мощности канальный;  
РОУ - редуционно-охладительные установки;  
РППВ – регенеративный подогрев питательной воды;  
РУ – реакторная установка;  
РТ – рабочее тело;  
СПП - ступень пароперегревателя;  
СУЗ – система управления и защиты;  
ТВС – тепловыделяющая сборка;

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		10

ТН – теплоноситель;

ТЭП – термоэлектрический преобразователь;

ЦВД – цилиндр высокого давления;

ЦНД – цилиндр низкого давления.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		11

## Оглавление

Введение.....	16
1 Расчет реакторной установки .....	18
1.1 Обоснование конструкции .....	18
1.2 Подготовка параметров к расчету реактора.....	19
1.2.1 Основные технические характеристики реактора ВВЭР-1200 ...	19
1.2.2 Определение геометрических характеристик активной зоны.....	22
1.2.3 Определение общего расхода теплоносителя реакторе .....	25
1.3 Предварительный теплогидравлический расчет .....	26
1.4 Уточненный теплогидравлический расчет .....	33
1.4.1 Максимально нагруженный ТВЭЛ.....	33
1.5 Гидравлический расчет .....	35
1.6 Механический расчет элементов реактора.....	37
1.6.1 Расчет корпуса реактора.....	37
1.6.2 Расчет эллиптического днища .....	38
1.6.3 Расчет термических напряжений в сердечнике .....	38
1.6.4 Термические напряжения в оболочке тепловыделяющего элемента .....	42
2 Расчет парогенератора.....	44
2.1 Выбор и обоснование конструктивной схемы ПГ .....	44
2.2 Расчёт основных параметров ПГ .....	45
2.3 Предварительный конструкторский расчет .....	47
2.3.1 Расчет на 2 ПГ .....	48
2.3.2 Расчет на 3 ПГ .....	52
2.4 Построение тепловой диаграммы .....	52
2.5 Тепловой расчёт .....	54
2.5.1 Расчет толщины стенок труб теплопередающей поверхности ...	54
2.5.2 Число труб теплопередающей поверхности .....	56
2.5.3 Расчет площади теплопередающей поверхности испарительного участка ПГ.....	57
2.5.4 Расчет площади теплопередающей поверхности экономайзерного участка ПГ.....	62

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		12

2.5.5	Расчет площади теплопередающей поверхности ПГ и длины трубок .....	66
2.6	конструкторский расчет и расчет на прочность отдельных узлов ...	66
2.6.1	Выбор материала и диаметра труб теплопередающей поверхности и коллектора ТН, материала корпуса .....	66
2.6.2	Определение конфигурации поперечного сечения пучка теплообменных трубок .....	68
2.7	Расчет на прочность .....	70
2.7.1	Корпус парогенератора .....	70
2.7.2	Толщина стенок боковых обечаек .....	70
2.7.3	Толщина стенки эллиптических днищ .....	71
2.7.4	Толщина крышек люков-лазов и крышки коллектора ТН .....	71
2.7.5	Система подачи питательной воды .....	72
2.8	Гидравлический расчет. Гидравлическое сопротивление при движении ТН .....	74
3	Расчет тепловой схемы .....	77
3.1	Анализ принципиальной тепловой схемы прототипа .....	77
3.1.1	Обоснование схемы включения питательного насоса, тип привода питательного насоса .....	78
3.1.2	Обоснование схемы включения конденсатного насоса .....	79
3.1.3	Обоснование необходимости деаэратора и схемы включения деаэрационной установки .....	80
3.2	Предварительный расчет тепловой схемы на конденсационный режим .....	81
3.2.1	Определение количества ступеней в трактах высокого и низкого давления .....	82
3.2.2	Определение параметров пара и воды в элементах турбоустановки .....	85
3.3	Предварительная проверка на индифферентную точку .....	91
3.4	Расчет тепловой схемы энергоблока .....	92
3.4.1	Уравнение материального и теплового баланса вспомогательных элементов тепловой схемы .....	92
3.4.2	Общие уравнения материального баланса .....	94
3.4.3	Уравнения материального и теплового балансов теплообменников регенеративной системы .....	95
3.4.4	Расходы пара и воды в характерных точках .....	100

3.5	Определение показателей экономичности энергоблока (станции)	100
3.6	Выбор оборудования, оценка мощности основных механизмов собственных нужд.....	102
3.7	Обоснование числа петель реакторного контура .....	107
3.7.1	Расчет числа потоков в ЦНД турбины.....	108
4	Расчет рассеивания выбросов АЭС.....	110
5	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	112
5.1	Бюджет научно-исследовательской работы (НИР) .....	113
5.2	Расчет материальных затрат НИР .....	114
5.3	Основная заработная плата исполнителей темы .....	115
5.4	Дополнительная заработная плата .....	117
5.5	Отчисления во внебюджетные фонды.....	117
5.6	Накладные расходы .....	118
5.7	Формирование бюджета затрат НИР .....	119
6	Социальная ответственность .....	120
6.1	Анализ рабочего места оператора турбинного цех .....	121
6.1.1	Микроклимат .....	122
6.1.2	Монотонность труда .....	123
6.1.3	Освещённость .....	123
6.1.4	Электромагнитное излучение .....	125
6.2	Опасные факторы.....	125
6.2.1	Электробезопасность помещения .....	125
6.2.2	Температура поверхностей оборудования .....	126
6.3	Охрана окружающей среды .....	127
6.3.1	Анализ воздействия на атмосферу .....	127
6.4	Правовое обеспечение безопасности жизнедеятельности на производстве.....	129
6.4.1	Основные организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	129
6.4.2	Социальное страхование работников .....	130
7	Система автоматического регулирования температуры свежего пара после РОУ .....	133
7.1	Краткое описание объекта регулирования .....	133

7.2 Разработка структуры автоматической системы регулирования температуры пара.....	134
7.3 Выбор технических средств для реализации систем контроля и автоматизации ТОУ .....	135
7.3.1 Первичный преобразователь.....	135
7.3.2 Регулирующие устройства.....	136
7.3.3 Блок управления.....	137
7.3.4 Исполнительный механизм.....	137
7.3.5 Пускатель .....	137
7.4 Разработка функциональных схем систем контроля и автоматизации ТОУ .....	138
7.5 Выполнение заказной спецификации на технические средства контроля и автоматизации ТОУ .....	138
Заключение .....	139
Список используемых источников.....	141
Приложение А .....	146
Приложение Б.....	148
Приложение В .....	151
Приложение Г .....	152
Приложение Ж.....	160
Приложение И .....	162

Графические материалы:

ФЮРА.693100.002 СБ - Реактор ВВЭР-1200;

ФЮРА.693420.003 СБ – Парогенератор ПГВ-1000МКП;

ФЮРА.311000.004 Т6 – Технологическая схема энергоблока ВВЭР-1200;

ФЮРА.311115.005 Т7 – Компоновка главного здания АЭС с реактором ВВЭР-1200;

ФЮРА.42100.006 С2 – Схема автоматического регулирования температуры острого пара после РОУ.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		15

## Введение

В наше время остро стоит вопрос об использовании энергоресурсов в связи с их исчерпаемостью и малой возобновляемостью. Уголь, нефть и газ являются основными источниками энергии в нашем мире, и только потом – гидроресурсы и ядерное топливо.

Так как органическое топливо практически невозполнимо, мы все чаще задумываемся об использовании нетрадиционных источников энергии, в том числе и о ядерной энергетике.

Атомная энергетика имеет большие возможности для развития в нашей стране. Имея такие преимущества, как высокая энергоемкость топлива, возможность его повторного использования, отсутствие парникового эффекта атомная промышленность имеет все шансы стать ведущей отраслью энергетике.

В настоящее время самым мощным водо-водяным реактором является ВВЭР-1200. Данный реактор относится к поколению 3+, в котором есть следующие преимущества, в сравнении с ВВЭР-1000:

- установленная мощность (э.) – 1200 МВт;
- новые «пассивные системы безопасности», которые способны функционировать без вмешательства операторов даже при полном обесточивании станции;
- двойная защитная оболочка, в которой внутренняя оболочка предотвращает утечку радиоактивных веществ при авариях, а внешняя оболочка противостоит природным и техногенным воздействиям, таким как, например, падение самолёта;
- фильтры на выходе из межоболочного вентилируемого пространства;
- уникальная ловушка расплава с жертвенным материалом.

Целью данного проекта является проектирование энергоблока АЭС

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		16

с электрической мощностью 1200 МВт. Важным аспектом проекта является расчет ядерного реактора на 2 и 3 петли. После технико-экономического расчета необходимо сделать вывод о эффективности каждого случая.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		17

# 1 Расчет реакторной установки

## 1.1 Обоснование конструкции

В России успешно эксплуатируются Балаковская, Калининская, Нововоронежская, Кольская и другие АЭС с реакторами типа ВВЭР. Конструктивно ВВЭР относятся к корпусным реакторам, по спектру нейтронов – к тепловым, по материалам, обеспечивающим замедление нейтронов и отвод тепла – к легководяным реакторам. В качестве топлива обычно используется низкообогащённый (2-5%) диоксид урана  $UO_2$ .

Физической особенностью этих реакторов, отличающей их от графитовых или тяжеловодных, является тесная решётка твэлов. Типичное значение отношения объёмов воды и топлива равно примерно двум, что в сочетании с хорошими теплофизическими свойствами воды обеспечивает компактность активной зоны, высокие значения объёмного энерговыделения и возможность изготовленный в заводских условиях корпус, рассчитанный на давление  $15 \div 25$  МПа.

Основание для разработки проекта, в которой используется реактор ВВЭР-1200, является исполнение Федеральной целевой программы (ФЦП) «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» России, заявленных в ФЦП, должно основываться на базе научно-технических решений, уже имеющихся в отрасли и надёжно обеспечивать сжатые сроки ввода и технико-экономические параметры, составляющие основу конкурентоспособности энергоблоков.

Разработка технического задания выполнялась с целью обеспечения создания энергоблоков с ВВЭР большой мощности с улучшенными технико-экономическими показателями и показателями безопасности.

Концепция проекта с реактором ВВЭР-1200 включает в себя следующие технические задачи:

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		18

- создание конкурентоспособного на внутреннем и внешнем рынках серийного проекта реакторной установки единичной электрической мощностью 1200 МВт за счет реального достижения мирового уровня по технико-экономическим показателям и принятым международным энергетическим сообществом критериям безопасности;

- для обеспечения повышения технико-экономических показателей реакторная установка разрабатывается на номинальную тепловую мощность реактора 3200 МВт, срок службы РУ составляет 60 лет;

- согласно принятому эволюционному подходу при разработке технического проекта РУ максимально используются результаты проектирования, расчетного, экспериментального обоснования проектов В-320, В-392, а также опыт эксплуатации РУ с ВВЭР-1000;

В проекте используются ранее выполненные конструкторские решения:

- конструкция ядерного реактора на базе проекта «В-392» с увеличенным диаметром корпуса;

- конструкция парогенератора на базе проекта ПГВ-1000М с увеличенным диаметром корпуса и разреженной коридорной компоновкой теплообменных труб в трубном пучке;

- главный циркуляционный насосный агрегат – ГЦНА-1391.

## **1.2 Подготовка параметров к расчету реактора**

### **1.2.1 Основные технические характеристики реактора ВВЭР-1200**

Основные технические характеристики реактора ВВЭР-1200, представлены по материалам ОКБ «Гидропресс» и сведены в таблицу 1 [1].

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		19

Таблица 1 – Технические характеристики реактора ВВЭР-1200

Номинальная тепловая мощность реактора, МВт	3200
Количество циркуляционных петель, шт.	3
Давление в 1 контуре, МПа	16,2
Давление во 2 контуре, МПа	7,0
Температура теплоносителя в реакторе, °С:	
- на входе	298,6
- на выходе	329,7
Расход теплоносителя через реактор, м <sup>3</sup> /ч	86000
Количество ТВС в активной зоне, шт.	163
Количество органов регулирования СУЗ, шт.	121
Максимальная линейная нагрузка на ТВЭЛ, Вт/см	420
Максимальная глубина выгорания топлива, средняя по ТВС, МВт сут./кг U	До 70
Паропроизводительность, т/ч	3х2136
Периодичность перегрузок, мес.	18

Для реакторов типа ВВЭР-1200 разработан 18-месячный топливный цикл, начиная с первой кампании. Первая топливная загрузка формируется из ТВС-2М с удлиненным топливным столбом без бланкетов (373/375 см в холодном/горячем состоянии). Тепловая мощность реакторной установки составляет 3200 МВт. Обогащение топлива в первой загрузке лежит в диапазоне от 1,9 до 3,9 %, среднее обогащение составляет 2,96%. В качестве выгорающего поглотителя используется гадолиний в виде оксида ( $Gd_2O_3$ ). Использованы твэги с обогащением урана-235: 1,9 %, 2,4 % и 3,3 % с содержанием двуокиси гадолиния 5 % или 8 %вес. Количество твэгов составляет ~1,9% от общего количества тепловыделяющих элементов.

В активной зоне реактора ВВЭР-1200 используются ТВС-2М, характеристики которых приведены в таблице А.1 [2].

Таким образом, ТВС-2М включает в 331 узлах гексагональной решетки: твэл  $N_{ТВЭЛ} = 312$ , направляющий канал пэл  $N_{ПЭЛ} = 18$  и центральную каркасную трубку  $N_{ЦК} = 1$ .

Активная зона реактора ВВЭР-1200 состоит из 163 ТВС. В 121 из них используются органы регулирования. В проекте «АЭС-2006» с реакторами

ВВЭР-1200 применяется традиционное оксидное топливо с максимальным обогащением до 5%, что позволяет обеспечить топливные циклы с максимальным выгоранием топлива до 70 Мвт·сут/кг (урана). Также для данного типа реакторов в качестве тепловыделяющей сборки выбрана конструкция ТВС-2М отличающаяся увеличением длины топливного столба.

На рисунке 1 изображена активная зона реактора ВВЭР-1200 для стационарной топливной загрузки, верхнее число – номер ТВС, нижнее число – номер группы органов регулирования.

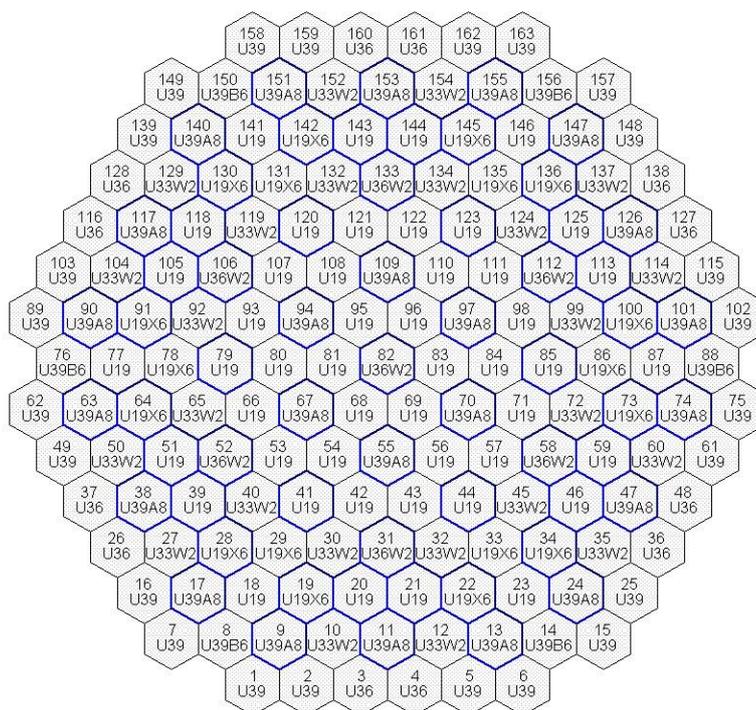


Рисунок 1 – Расположение групп органов регулирования СУЗ [3]

На рисунке 2 изображен состав активной зоны реактора ВВЭР-1200 по группам ТВС. Верхнее число – порядковый номер ТВС, нижняя аббревиатура – тип ТВС. Характеристики типов ТВС-2М приведены в таблице А.2 [2].

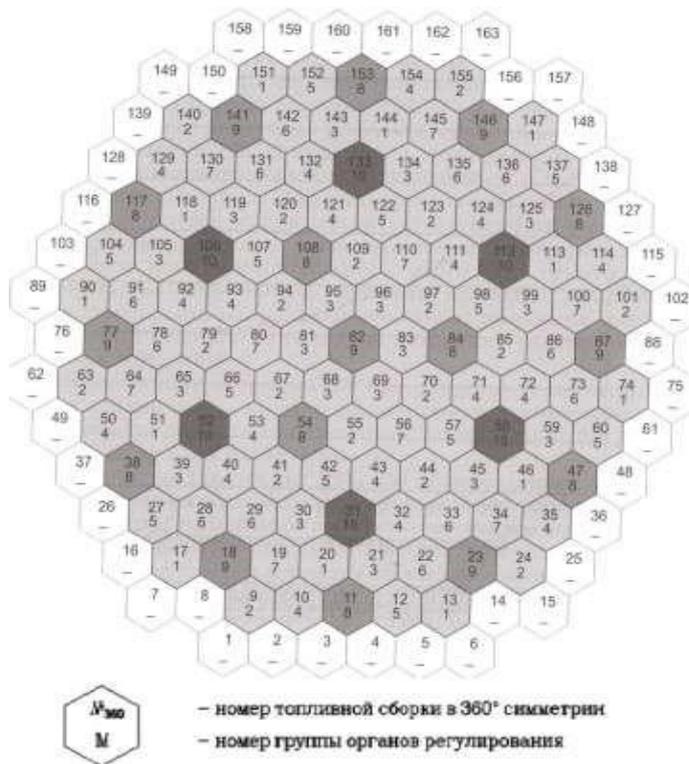


Рисунок 2 - Картограмма первой топливной загрузки [2]

## 1.2.2 Определение геометрических характеристик активной зоны

Объем активной зоны:

$$V_{AZ} = \frac{N_T}{W} = \frac{3200}{110} = 29,1 \text{ м}^3.$$

Высоту активной зоны примем по прототипу (ТВС-2М) из таблицы А.1:

$$H_0 = 3730 \text{ мм.}$$

Эквивалентный диаметр активной зоны цилиндрической формы:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{AZ}}{\pi \cdot H_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 29,1}{\pi \cdot 3,73}} = 3,2 \text{ м;}$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		22

$$\frac{H_0}{D_0} = \frac{3,73}{3,2} = 1,166.$$

Отношение высоты активной зоны к ее диаметру близко к значению в существующих реакторах типа ВВЭР [4, с.156].

Площадь поперечного сечения активной зоны реактора:

$$S_{AZ} = \frac{V_{AZ}}{H_0} = \frac{29,1}{3,73} = 7,8 \text{ м.}$$

По известному общему числу мест определим число рядов  $N_{\text{ряд}}$ . Число тепловыделяющих элементов на главной диагонали составляет  $N_D = 21$ , тогда общее число рядов:

$$N_D - N_{\text{ряд}} = N_{\text{ряд}} + 1;$$

$$N_{\text{ряд}} = \frac{N_D - 1}{2} = \frac{21 - 1}{2} = 10.$$

Определим размер под ключ:

$$S_{\text{ключ}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot a \cdot (1 + 1,5 \cdot N_{\text{ряд}}) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 1,275 \cdot (1 + 1,5 \cdot 10) = 23,6 \text{ см.}$$

Толщину водяного зазора между ТВС примем равной 1 мм.

Площадь одной ячейки с учетом водяного зазора:

$$f_{\text{яч}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{h_{\text{кл}} + \delta_{\text{вз}}}{2} \right)^2 = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{236 + 1}{2} \right)^2 = 48643 \text{ мм}^2 =$$

$$= 0,0486 \text{ м}^2.$$

Число ячеек в активной зоне:

$$n_{\text{яч}} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4 \cdot f_{\text{яч}}} = \frac{\pi \cdot 3,2^2}{4 \cdot 0,0486} = 165,48.$$

Из соображений симметричного расположения ТВС в АЗ число ячеек принято  $n_{\text{яч}} = 165$ .

Строим в масштабе эскиз активной зоны.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		23

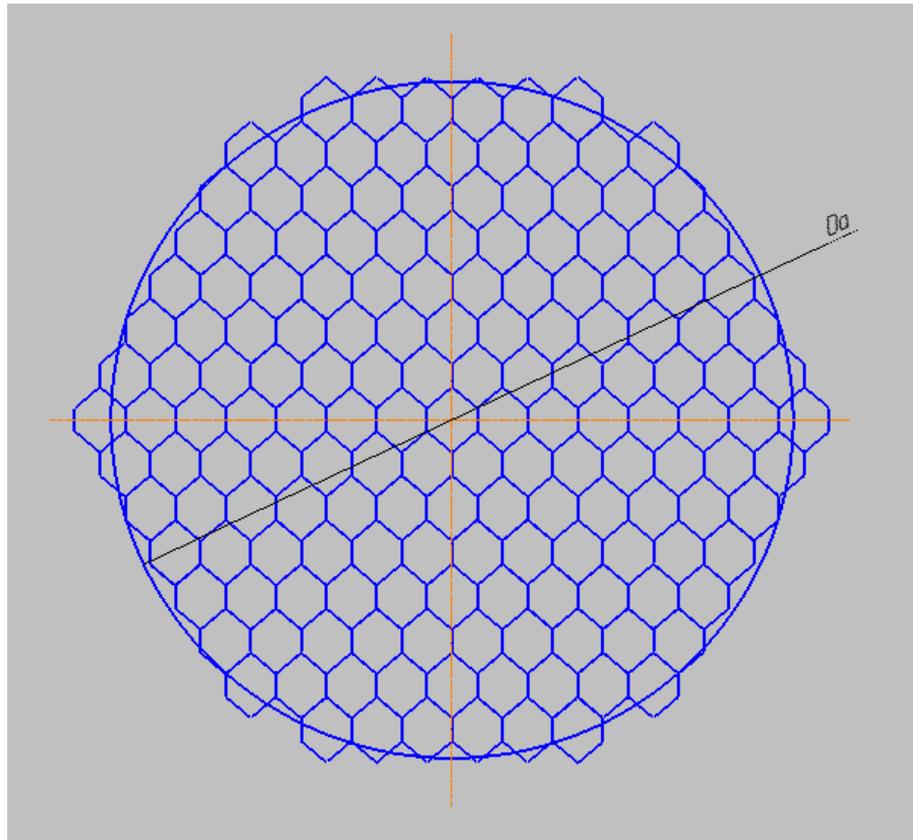


Рисунок 3 - Эскиз активной зоны

Проходное сечение в одной ячейке:

$$\begin{aligned}
 s_{\text{яч}} &= f_{\text{яч}} - \frac{\pi}{4} \cdot (n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot d_{\text{нар}}^2 + n_{\text{НК}} \cdot d_{\text{НК}}^2 + n_{\text{ЦК}} \cdot d_{\text{ЦК}}^2) = \\
 &= 0,0486 - \frac{\pi}{4} \cdot (312 \cdot 9,1^2 + 18 \cdot 13^2 + 1 \cdot 13^2) \cdot 10^{-6} = \\
 &= 0,0258 \text{ м}^2.
 \end{aligned}$$

Гидравлический периметр:

$$\begin{aligned}
 \Pi_{\Gamma} &= \pi \cdot (n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot d_{\text{нар}} + n_{\text{НК}} \cdot d_{\text{НК}} + n_{\text{ЦК}} \cdot d_{\text{ЦК}}) = \\
 &= \pi \cdot (312 \cdot 9,1 + 18 \cdot 13 + 1 \cdot 13) \cdot 10^{-3} = 10,186 \text{ м}.
 \end{aligned}$$

Гидравлический диаметр:

$$d_{\Gamma} = \frac{4 \cdot s_{\text{яч}}}{\Pi_{\Gamma}} = \frac{4 \cdot 0,0258}{10,168} = 0,0101 \text{ м}.$$

Тепловой периметр:

$$\Pi_{\text{T}} = \pi \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot d_{\text{нар}} = \pi \cdot 312 \cdot 9,1 \cdot 10^{-3} = 8,92 \text{ м}.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		24

Тепловой диаметр:

$$d_T = \frac{4 \cdot s_{\text{яч}}}{\Pi_T} = \frac{4 \cdot 0,0258}{8,92} = 0,0116 \text{ м.}$$

### 1.2.3 Определение общего расхода теплоносителя реакторе

Энтальпию теплоносителя на входе в АЗ и на выходе определим с помощью программы WaterSteamPro 6.5. Учитывая слабую зависимость энтальпии от давления, давление на входе принимаем без учета гидравлических потерь.

$$h_{\text{вх}} = f(16,2 \text{ МПа}; 298,6^\circ\text{C}) = 1329 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$h_{\text{вых}} = f(16,2 \text{ МПа}; 329,7^\circ\text{C}) = 1513 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Расход теплоносителя:

$$G = \frac{N_T}{h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}} = \frac{3200 \cdot 1000}{1513 - 1329} = 17391,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Тепловой поток по высоте АЗ симметричен, следовательно, температуру в центральном сечении определим, как среднеарифметическое температуры на входе и выходе из АЗ.

$$T_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} = \frac{298,6 + 329,7}{2} = 314,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Плотность теплоносителя при средней температуре:

$$\rho_{\text{ср}} = f(16,2 \text{ МПа}; 314,2 \text{ }^\circ\text{C}) = 696,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Средняя скорость теплоносителя в АЗ:

$$w = \frac{G}{s_{\text{яч}} \cdot n_{\text{яч}} \cdot \rho_{\text{ср}}} = \frac{17391,3}{0,0258 \cdot 165 \cdot 696,6} = 5,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		25

### 1.3 Предварительный теплогидравлический расчет

Эффективную добавку принимаем по прототипу  $\delta_{эф} = 0,08$  м [4, с.323].

Тогда высота с учетом эффективной добавки:

$$H = H_0 + 2 \cdot \delta_{эф} = 3,73 + 2 \cdot 0,08 = 3,89 \text{ м.}$$

Рассчитаем аксиальный коэффициент неравномерности [4, с.146]:

$$k_z = \frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H}\right)} = \frac{\pi \cdot 3,73}{2 \cdot 3,89 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 3,73}{2 \cdot 3,89}\right)} = 1,509.$$

Остальные коэффициенты неравномерности принимаем для ВВЭР-1000 на начало кампании [5, с.163].

$k_r k_E = 1,35$  – радиальный коэффициент, коэффициент, учитывающий кассеты с различным обогащением или различной глубины выгорания;

$k_T = 1,15$  – коэффициент, учитывающий неравномерность энерговыделения по ТВС;

Тогда коэффициент неравномерности по объему АЗ определится следующим образом:

$$k_v = k_z k_r k_E k_T = 1,509 \cdot 1,35 \cdot 1,15 = 2,343.$$

В дальнейшем будем вести расчеты только для максимально нагруженного твэла.

Линейный тепловой поток максимально нагруженного твэла в центральном сечении:

$$q_{l0}^{max} = \frac{N_T \cdot k_v}{H_0 \cdot n_{яч} \cdot n_{ТВЭЛ}} = \frac{3200 \cdot 1000 \cdot 2,343}{3,73 \cdot 165 \cdot 312} = 39,046 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}$$

Плотность теплового потока:

$$q_{s0}^{max} = \chi \frac{q_{l0}^{max}}{\pi \cdot d_{нар}} = 0,94 \frac{39,046}{\pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-3}} = 1283,85 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2},$$

где  $\chi = 0,94$  коэффициент, учитывающий энерговыделение в твэле [4, с.161].

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		26

Расход теплоносителя в расчете на один ТВЭЛ:

$$g = \frac{G}{n_{\text{яч}} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{17391,3}{165 \cdot 312} = 0,338 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Рассчитаем коэффициент теплоотдачи.

Для пучка стержней в треугольной упаковке справедлива формула [5, с.55]:

$$Nu = A Re^{0,8} Pr^{0,4},$$

$$\text{где } A = 0,0165 + 0,02 \cdot \left(1 - 0,91 \cdot \left(\frac{a}{d_{\text{нар}}}\right)^{-2}\right) \cdot \left(\frac{a}{d_{\text{нар}}}\right)^{0,15} = 0,0165 + 0,02 \cdot \\ \cdot \left(1 - 0,91 \cdot \left(\frac{12,75}{9,1}\right)^{-2}\right) \cdot \left(\frac{12,75}{9,1}\right)^{0,15} = 0,028.$$

Теплофизические свойства воды определяем с помощью программы WaterSteaPro 6.5:

$$\nu = f(16,2 \text{ МПа}; 314,2 \text{ }^\circ\text{C}) = 1,194 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$Pr = f(16,2 \text{ МПа}; 314,2 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,913;$$

$$\lambda = f(16,2 \text{ МПа}; 314,2 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,533 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{d_{\text{т}} \cdot w}{\nu} = \frac{0,012 \cdot 5,8}{1,194 \cdot 10^{-7}} = 582914.$$

Число Нуссельта:

$$Nu = 0,028 \cdot 582914^{0,8} \cdot 0,913^{0,4} = 1106.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{\text{т}}} = \frac{1106 \cdot 0,533}{0,012} = 49124 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Тепловой периметр ТВЭЛА:

$$\Pi_{\text{ТВЭЛА}} = \pi \cdot d_{\text{нар}} = \pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-3} = 0,029 \text{ м.}$$

Температурный перепад между наружной поверхностью оболочки ТВЭЛА и теплоносителем:

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		27

$$\Delta T_{\alpha} = \chi \frac{q_{l0}^{max}}{\Pi_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \alpha} = 0,94 \frac{39,046 \cdot 1000}{0,029 \cdot 49124} = 25,8^{\circ}\text{C}.$$

Температура наружной поверхности оболочки твэла:

$$T_{\text{об.нар}} = T_{\text{ср}} + \Delta T_{\alpha} = 314,2 + 25,8 = 340^{\circ}\text{C}.$$

Температура наружной поверхности оболочки твэла не превышает предельно допустимую температуру, при которой интенсивно начинает протекать паро-циркониевая реакция и ухудшается прочность  $T = 400^{\circ}\text{C}$  [4, с.34].

Примем в начальном приближении среднюю температуру оболочки твэла  $T_{\text{об}} = 350^{\circ}\text{C}$ .

Толщина оболочки твэла  $\delta_{\text{об}} = 0,57$  мм [6, с.540].

Коэффициент теплопроводности для сплава Э-110 можно найти по аппроксимационной формуле [7, с.160].

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{об}} &= 23,5 - 0,0192 \cdot (T_{\text{об}} + 273,15) + 1,68 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{\text{об}} + 273,15)^2 = \\ &= 23,5 - 0,0192 \cdot (350 + 273,15) + 1,68 \cdot 10^{-5} \cdot \\ &\quad \cdot (350 + 273,15)^2 = 18,059 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

Средний диаметр оболочки:

$$d_{\text{об}} = d_{\text{нар}} - \delta_{\text{об}} = 9,1 - 0,57 = 8,53 \text{ мм}.$$

Температура внутренней поверхности оболочки твэла:

$$\begin{aligned} T_{\text{об.вн}} &= T_{\text{об.нар}} + \chi \frac{q_{l0}^{max} \cdot \delta_{\text{об}}}{\pi \cdot d_{\text{об}} \cdot \lambda_{\text{об}}} = 340 + 0,94 \cdot \frac{39,046 \cdot 1000 \cdot 0,57 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 8,53 \cdot 10^{-3} \cdot 18,059} = \\ &= 383,2^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Проверяем среднюю температуру оболочки твэла:

$$T_{\text{об}} = \frac{T_{\text{об.нар}} + T_{\text{об.вн}}}{2} = \frac{340 + 383,2}{2} = 361,6^{\circ}\text{C}.$$

$$\left| \frac{350 - 361,6}{361,6} \right| \cdot 100\% = 3,2\% > 1\%.$$

Отклонение принятого значения от пересчитанного больше допустимого, следовательно, пересчитываем температуры с новым значением сред-

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		28

ней температуры оболочки.

После пересчета получаем  $T_{об.вн} = 383,2^{\circ}\text{C}$ .

Диаметр топливного сердечника принимаем  $d_c = 7,6$  мм по таблице А.1.

Диаметр внутренней стенки оболочки:

$$d_{вн} = d_{нар} - 2 \cdot \delta_{об} = 9,1 - 2 \cdot 0,57 = 7,96 \text{ мм.}$$

Величина газового зазора:

$$\delta_{гз} = \frac{d_{вн} - d_c}{2} = \frac{7,96 - 7,6}{2} = 0,18 \text{ мм.}$$

Отношение величины газового зазора к внутреннему диаметру оболочки:

$$\frac{\delta_{гз}}{d_{вн}} \cdot 100\% = \frac{0,18}{7,96} \cdot 100\% = 2,261\%.$$

Коэффициент проводимости контактного слоя определим по рисунку 4.

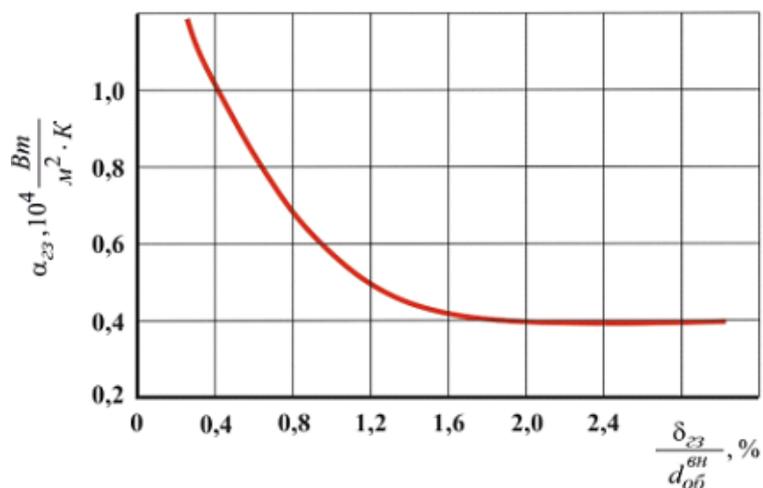


Рисунок 4 - Зависимость проводимости контактного слоя от отношения первоначального газового зазора к внутреннему диаметру

Из рисунка 4 -  $\alpha_{гз} = 0,4 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ .

Температура наружной поверхности топливного сердечника:

$$T_{с.нар} = T_{об.вн} + \chi \frac{q_{l0}^{max}}{\pi \cdot d_c \cdot \alpha_{ГЗ}} = 383,2 + 0,94 \frac{39,046 \cdot 1000}{\pi \cdot 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 10^4} = 767,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температуру на внутренней поверхности топливного сердечника в первом приближении примем  $T_{с.вн} = 1200^\circ\text{C}$ .

Эффективная температура топлива:

$$T_c = T_{с.нар} + 0,4 \cdot (T_{с.вн} - T_{с.нар}) = 767,5 + 0,4 \cdot (1200 - 767,5) = 940,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Теплопроводность диоксида урана с плотностью 95% от теоретической найдем по аппроксимационной формуле [7, с.40]:

$$\begin{aligned} \lambda_c &= \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot \tau + 3,6142 \cdot \tau^2} + \frac{6400}{\tau^{\frac{5}{2}}} \exp\left(-\frac{16,35}{\tau}\right) = \\ &= \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot 1,214 + 3,6142 \cdot 1,214^2} + \frac{6400}{1,214^{\frac{5}{2}}} \exp\left(-\frac{16,35}{1,214}\right) = \\ &= 2,917 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

где  $\tau = \frac{T_c + 273,15}{1000} = 1,214 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Диаметр центрального отверстия принимаем  $d_0 = 1,2 \text{ мм}$  [6, с.540].

Температура внутренней поверхности топливного сердечника:

$$\begin{aligned} T_{с.вн} &= T_{с.нар} + \chi \frac{q_{l0}^{max}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_c} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot d_0^2}{d_c^2 - d_0^2} \cdot \ln\left(\frac{d_c}{d_0}\right)\right] = \\ &= 767,5 + 0,94 \frac{39,046 \cdot 1000}{4 \cdot \pi \cdot 2,917} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot 1,2^2}{7,6^2 - 1,2^2} \cdot \ln\left(\frac{7,6}{1,2}\right)\right] = 1674 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Пересчитываем эффективную температуру топливного сердечника:

$$T_c = T_{с.нар} + 0,4 \cdot (T_{с.вн} - T_{с.нар}) = 767,5 + 0,4 \cdot (1674 - 767,5) = 1130 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отклонение пересчитанной температуры от принятой в первом приближении:

$$\left| \frac{940,5 - 1130}{1130} \right| \cdot 100\% = 16\% > 1\%.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		30

Отклонение принятого значения от пересчитанного больше допустимого, следовательно, пересчитываем температуры с новым значением эффективной температуры топлива.

После 4 итераций получаем следующие температуры:

$$T_{с.вн} = 1844 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_c = T_{с.нар} + 0,4 \cdot (T_{с.вн} - T_{с.нар}) = 767,5 + 0,4 \cdot (1844 - 767,5) = 1198 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура на внутренней поверхности топливного сердечника не превышает температуры при которой начинается интенсивный выход газообразных продуктов деления из топливной таблетки  $T = 2600 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Критический поток в пучке стержней в центральном сечении:

$$q_{кр} = \frac{0,131 \cdot (1 - 0,286 \cdot X)^{\frac{1}{3}}}{42 \cdot \left(1 + \frac{H_0}{3,54}\right)} \cdot r \cdot \rho' \left[ g \cdot d_T (g \cdot a')^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot (Pr')^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{5}},$$

$$\text{где } X = x \left( \frac{(\rho w)^2 \cdot d_T}{\rho' \cdot \sigma} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad Re = \frac{\rho w \cdot d_T}{\mu'}.$$

Параметры теплоносителя определим с помощью программы WaterSteamPro 6.5:

$$\sigma = f(16,2 \text{ МПа}) = 3,976 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$

$$\rho' = f(16,2 \text{ МПа}) = 581,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$a' = f(16,2 \text{ МПа}) = 8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$r = f(16,2 \text{ МПа}) = 916,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$Pr' = f(16,2 \text{ МПа}) = 1,466;$$

$$\mu' = f(16,2 \text{ МПа}) = 6,658 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$h' = f(16,2 \text{ МПа}) = 1658 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$h = f(16,2 \text{ МПа}; 314,2^\circ\text{C}) = 1416 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		31

Относительная энтальпия:

$$x = \frac{h - h'}{r} = \frac{1416 - 1658}{916,8} = -0,264.$$

Массовая скорость:

$$\rho w = 581,1 \cdot 5,8 = 3370,38 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Обобщенное массовое паросодержание:

$$X = x \left( \frac{(\rho w)^2 d_T}{\rho' \sigma} \right)^{\frac{1}{5}} = -0,264 \cdot \left( \frac{3370,38^2 \cdot 0,012}{581,1 \cdot 3,976 \cdot 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{5}} = -2,376.$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{3370,38 \cdot 0,012}{6,7998 \cdot 10^{-5}} = 594790.$$

Критическая плотность теплового потока:

$$q_{кр} = \frac{0,131 \cdot (1 - 0,286X)^{\frac{1}{3}}}{42 \cdot \left(1 + \frac{H_0}{3,54}\right)} \cdot r \rho' \left[ g d_T (g a')^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot (Pr')^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{5}} =$$
$$= \frac{0,131 \cdot (1 - 0,286 \cdot (-2,376))^{\frac{1}{3}}}{42 \cdot \left(1 + \frac{3,73}{3,54}\right)} \cdot 916,8 \cdot 581,1 \cdot$$
$$\cdot \left[ 9,81 \cdot 0,012 \cdot (9,81 \cdot 8 \cdot 10^{-8})^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot (1,466)^{\frac{1}{3}} \cdot 594790^{\frac{1}{5}} = 1604 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}.$$

Коэффициент запаса до кризиса:

$$k_{зап} = \frac{q_{кр}}{q_{s0}^{max}} = \frac{1604}{1283,85} = 1,249.$$

Коэффициент запаса до кризиса выше минимально допустимого  $k_{зап} = 1,2 \div 1,3$ , следовательно АЗ отвечает требованиям теплотехнической надежности.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		32

## 1.4 Уточненный теплогидравлический расчет

### 1.4.1 Максимально нагруженный твэл

Эффективную добавку принимаем по прототипу  $\delta_{эф} = 0,08$  м [3, с.323].

Тогда высота с учетом эффективной добавки:

$$H = H_0 + 2 \cdot \delta_{эф} = 3,73 + 2 \cdot 0,08 = 3,89 \text{ м.}$$

Рассчитаем аксиальный коэффициент неравномерности [3, с.146]:

$$k_z = \frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H}\right)} = \frac{\pi \cdot 3,73}{2 \cdot 3,89 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 3,73}{2 \cdot 3,89}\right)} = 1,509.$$

Остальные коэффициенты неравномерности принимаем для ВВЭР-1200 на начало кампании [5, с.163].

$k_r k_E = 1,35$  – радиальный коэффициент, коэффициент, учитывающий кассеты с различным обогащением или различной глубины выгорания;

$k_T = 1,15$  – коэффициент, учитывающий неравномерность энерговыделения по ТВС.

Тогда коэффициент неравномерности по объему АЗ определится следующим образом:

$$k_v = k_z k_r k_E k_T = 1,509 \cdot 1,35 \cdot 1,15 = 2,343.$$

Линейный тепловой поток в центральном сечении:

$$q_{l0} = \frac{N_T \cdot k_v}{H_0 \cdot n_{яч} \cdot n_{ТВЭЛ}} = \frac{3200 \cdot 1000 \cdot 2,343}{3,73 \cdot 165 \cdot 312} = 39,05 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}.$$

Плотность теплового потока:

$$q_{s0} = \chi \frac{q_{l0}}{\pi \cdot d_{нар}} = 0,94 \frac{39,05}{\pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-3}} = 1284 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2},$$

где  $\chi = 0,94$  коэффициент, учитывающий энерговыделение в твэле [3, с.161].

Расход теплоносителя в расчете на один твэл:

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		33

$$g = \frac{G}{n_{\text{яч}} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{17391,3}{165 \cdot 312} = 0,338 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Линейный тепловой поток по высоте твэла изменяется в соответствии с законом:

$$q_l(z) = q_{l0} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right).$$

Теплота, переданная теплоносителю к высоте  $z$ :

$$Q_{\text{ТВЭЛ}}(z) = \frac{q_{l0} \cdot H}{\pi} \cdot \left( \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) + \sin\left(\frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H}\right) \right).$$

Энтальпия теплоносителя на высоте  $z$ :

$$h(z) = \frac{Q_{\text{ТВЭЛ}}(z)}{g} + h_{\text{вх}},$$

где  $h_{\text{вх}} = 1329 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  – энтальпия теплоносителя на входе в активную зону.

Относительная энтальпия на высоте  $z$ :

$$x(z) = \frac{h(z) - h'}{r},$$

где  $h' = 1658 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  энтальпия сухого насыщенного пара,  $r = 916,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  – удельная теплота парообразования.

По известной энтальпии и давлению находим все необходимые нам параметры теплоносителя с помощью программы WaterSteaPro 6.5.

Скорость в любой точке по высоте находим как:

$$w_{\text{тн}} = \frac{g \cdot n_{\text{ТВЭЛ}}}{s_{\text{яч}} \cdot \rho(z)},$$

где  $s_{\text{яч}} = 0,0258 \text{ м}^2$  – проходное сечения для теплоносителя в одной твс.

Далее расчет ведется по алгоритму, изложенному в предварительном теплогидравлическом расчете.

Результаты расчетов параметров теплоносителя по высоте активной зоны, распределение температуры по радиусу твэла в зависимости от высоты и коэффициент запаса по высоте твэла представлены в приложении Б.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		34

Наглядное распределение температур твэла по высоте аз, зависимость линейного теплового потока и коэффициента запаса от высоты представлены на рисунке Б.1, Б.2.

### 1.5 Гидравлический расчет

Все геометрические размеры корпуса, шахты и др. примем на основе эскиза реактора.

Потери на трение в активной зоне:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \cdot \frac{H_{\text{аз}}}{d_r} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}.$$

Коэффициент сопротивления трения пучка рассчитывается по [8, с. 21] для продольного омывания пучка круглых стержней, расположенных в треугольной упаковке:

$$\xi_{\text{тр}} = \xi_0 \cdot [0,57 + 0,18 \cdot (x - 1) + 0,53 \cdot (1 - \exp(-a))],$$

где  $a = 0,58 + 9,2 \cdot (x - 1) = 0,58 + 9,2 \cdot (1,4 - 1) = 4,27$ ;

$$\xi_0 = (1,82 \cdot \lg(Re) - 1,64)^{-2} = (1,82 \cdot \lg(582914) - 1,64)^{-2} = 0,013;$$

$$\xi_{\text{тр}} = 0,013 \cdot [0,57 + 0,18 \cdot (1,4 - 1) + 0,53 \cdot (1 - \exp(-4,27))] = 0,015.$$

$$\Delta P_{\text{тр}} = 0,015 \cdot \frac{3,73}{0,01} \cdot \frac{696,6 \cdot 5,8^2}{2} = 65560 \text{ Па.}$$

Нивелирная составляющая потери давления:

$$\Delta P_{\text{нив}} = \rho \cdot g \cdot H_{\text{аз}} = 696,6 \cdot 9,81 \cdot 3,73 = 25490 \text{ Па.}$$

Местные потери от дистанционирующей решетки.

Коэффициент местных сопротивлений для дистанционирующей решетки ТВС-2М примем по [9, с.21]:  $\xi_{\text{д.р.}} = 0,46$ .

$$\Delta P_{\text{д.р.}} = n_{\text{д.р.}} \cdot \xi_{\text{д.р.}} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = 13 \cdot 0,46 \cdot \frac{696,6 \cdot 5,8^2}{2} = 70070 \text{ Па,}$$

где  $n_{\text{д.р.}} = 13$  – количество дистанционирующих решеток в ТВС.

Местные сопротивления на входе в реактор из входного патрубка.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		35

Коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении потока [10, с.35]:

$$\xi_M^{вх} = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 = \left(1 - \frac{1}{6,693}\right)^2 = 0,724,$$

где  $n$  – отношение площади проходного сечения канала за расширением к площади канала до расширения, определяющая скорость – скорость потока до расширения.

$$n = \frac{f_{\text{опуск}}}{f_{\text{патр}}} = \frac{3,795}{0,567} = 6,693;$$

$$f_{\text{патр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{патр}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,85^2}{4} = 0,567 \text{ м}^2;$$

$$f_{\text{опуск}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{вн}}^{\text{корп}^2} - d_{\text{нар}}^{\text{шахты}^2})}{4} = \frac{\pi \cdot (4,15^2 - 3,52^2)}{4} = 3,795 \text{ м}^2.$$

Скорость движения теплоносителя во входном патрубке:

$$w_{\text{патр}} = \frac{G}{3 \cdot \rho' \cdot f_{\text{патр}}} = \frac{17391,3}{3 \cdot 730,7 \cdot 0,567} = 13,9 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

где  $\rho' = 751,9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность теплоносителя на входе в реактор;

3 – количество петель в ВВЭР-1200.

Местные потери давления на входе в реактор:

$$\Delta P_M^{вх} = \xi_M^{вх} \cdot \frac{\rho' \cdot w_{\text{патр}}^2}{2} = 0,724 \cdot \frac{730,7 \cdot 13,9^2}{2} = 51110 \text{ Па.}$$

Местные сопротивления на выходе реактора из выходного патрубка.

Коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении [9, стр.35]:

$$\xi_M^{вых} = 0,5 \cdot (1 - m) = 0,5 \cdot (1 - 0,149) = 0,425,$$

где  $m = \frac{1}{n} = \frac{1}{6,693} = 0,149$  – отношение площади за сужением к площади канала перед сужением, определяющая скорость – скорость потока за сужением.

Скорость движения теплоносителя в выходном патрубке:

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		36

$$w_{\text{патр}} = \frac{G}{3 \cdot \rho'' \cdot f_{\text{патр}}} = \frac{17391,3}{3 \cdot 655 \cdot 0,567} = 15,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Местные потери давления на выходе из реактора:

$$\Delta P_{\text{М}}^{\text{ВЫХ}} = \xi_{\text{М}}^{\text{ВЫХ}} \cdot \frac{\rho'' \cdot w_{\text{патр}}^2}{2} = 0,425 \cdot \frac{655 \cdot 15,6^2}{2} = 33870 \text{ Па.}$$

Таким образом, суммарные потери давления:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{нив}} + \Delta P_{\text{д.р.}} + \Delta P_{\text{М}}^{\text{ВХ}} + \Delta P_{\text{М}}^{\text{ВЫХ}} = \\ &= \frac{65560 + 25490 + 70070 + 51110 + 33870}{10^6} = 0,246 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

## 1.6 Механический расчет элементов реактора

### 1.6.1 Расчет корпуса реактора

Расчет проводим для нижней обечайки корпуса. Толщину стенки обечайки определяем по следующей методике [11, с.312]:

$$\delta_{\text{р}} = \frac{p_{2\text{р}} \cdot d_{\text{вн}}^{\text{корп}}}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma_{\text{Н}}] - p_{2\text{р}}} + c.$$

Расчетное давление рабочего тела:

$$p_{2\text{р}} = 0,9 \cdot 1,25 \cdot p_2 = 0,9 \cdot 1,25 \cdot 16,2 = 18,23 \text{ МПа.}$$

Материал обечайки примем: сталь 15Х2НМФА.

Допускаемое напряжение для этой марки стали при максимальной рабочей температуре  $[\sigma_{\text{Н}}] = 208,8 \text{ МПа}$ .

Коэффициент прочности принимаем  $\varphi = 1$ .

Расчетная толщина стенки обечайки:

$$\delta_{\text{р}} = \frac{18,23 \cdot 4150}{2 \cdot 1 \cdot 208,8 - 18,23} + c = 189,4 \text{ мм} + c.$$

Прибавка к толщине стенки определяется по соотношению:

$$c = c_1 + c_2 + c_3 + c_4,$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		37

где  $c_1$  – минусовой допуск на толщину стенки, мм;  $c_2$  – утонение стенки за счет коррозионных процессов с учётом срока службы корпуса, мм;  $c_3$  – необходимое утолщение стенки по техническим, монтажным и другим соображениям проектирующих или изготавливающих предприятий, мм;  $c_4$  – утонение стенки в месте гибов, мм.

$$c_1 = 0,1 \cdot (\delta_p - c) = 0,11 \cdot 189,4 = 20,8 \text{ мм};$$

$$c_2 = 0 \text{ мм}; \quad c_3 = 0,1 \text{ мм}; \quad c_4 = 0 \text{ мм};$$

$$c = 20,8 + 0 + 0,1 + 0 = 20,9 \text{ мм};$$

$$\delta_p = 189,4 + 20,9 = 210,3 \text{ мм}.$$

Полученную толщину округляем в большую сторону до значения:

$$\delta_p \approx 211 \text{ мм}.$$

Наружный диаметр корпуса:

$$d_{\text{нар}}^{\text{корп}} = d_{\text{вн}}^{\text{корп}} + 2 \cdot \delta_p = 4150 + 2 \cdot 211 = 4572 \text{ мм}.$$

### 1.6.2 Расчет эллиптического днища

Номинальная толщина днища:

$$\delta_d^p = \frac{p_{2p} \cdot d_{\text{вн}}^{\text{корп}}}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma_H]} \cdot \frac{d_{\text{вн}}^{\text{корп}}}{2 \cdot h_d} + c = \frac{18,23 \cdot 4150}{4 \cdot 2 \cdot 208,8} \cdot \frac{4150}{2 \cdot 1009} + 20,9 = 115 \text{ мм},$$

где  $h_d = 1009$  мм - высота выпуклой части днища.

### 1.6.3 Расчет термических напряжений в сердечнике

Расчет проводим в наиболее энергонапряженном сечении твэла.

Формулы для расчета радиальных, кольцевых и осевых термомеханических напряжений [11]:

$$\sigma_{RR} = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_V}{16 \cdot \lambda \cdot (1 - \nu)} \cdot (r^2 - R^2);$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_V \cdot R^2}{16 \cdot \lambda \cdot (1 - \nu)} \cdot \left( \frac{3 \cdot r^2}{R^2} - 1 \right);$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		38

$$\sigma_{zz} = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_v}{16 \cdot \lambda \cdot (1 - \nu)} \cdot \left( r^2 - \frac{1}{2} \cdot R^2 \right),$$

где  $r$  – текущее значение координаты, м,  $r \in [0; R]$ ;  $R$  – радиус топливного сердечника, м;  $q_v$  – объемное энерговыделение, Вт/м<sup>3</sup>;  $E$  – модуль Юнга, Па;  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения, 1/К;  $\nu = 0,316$  – коэффициент Пуассона;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

Очевидно, что больше всего подвержены растрескиванию периферийный слой и слой на поверхности центрального отверстия, произведем расчеты для этих двух радиусов.

Расчет для слоя на поверхности топливной таблетки:

Модуль Юнга:

$$\begin{aligned} E &= 22,9 \cdot 10^4 - 20,1 \cdot T_c - 58,7 \cdot 10^4 \cdot P = \\ &= 22,9 \cdot 10^4 - 20,1 \cdot 916,3 - 58,7 \cdot 10^4 \cdot 0,08 = 1,58 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

где  $P = 0,08$  – пористость топлива.

Коэффициент термического расширения:

$$\alpha = \begin{cases} 4,83 \cdot 10^{-6} - 6,39 \cdot 10^{-10} \cdot T_i + 1,33 \cdot 10^{-12} T_i^2 - 1,76 \cdot 10^{-17} T_i^3, & \text{если } T_i \leq 923 \text{ К;} \\ 1,13 \cdot 10^{-5} - 5,01 \cdot 10^{-6} \cdot T_i + 3,76 \cdot 10^{-12} T_i^2 - 6,13 \cdot 10^{-17} T_i^3, & \text{если } T_i > 923 \text{ К.} \end{cases}$$

Так как  $T_c > 923$  К, то:

$$\alpha = 1,13 \cdot 10^{-5} - 5,01 \cdot 10^{-6} \cdot 1198 + 3,76 \cdot 10^{-12} 1198^2 - 6,13 \cdot 10^{-17} 1198^3 = 1,59 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}.$$

Теплопроводность диоксида урана с плотностью 95% от теоретической найдем по аппроксимационной формуле:

$$\begin{aligned} \lambda_c &= \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot \tau + 3,6142 \cdot \tau^2} + \frac{6400}{\tau^{\frac{5}{2}}} \exp\left(-\frac{16,35}{\tau}\right) = \\ &= \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot 1,471 + 3,6142 \cdot 1,471^2} + \frac{6400}{1,471^{\frac{5}{2}}} \cdot \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{16,35}{1,471}\right) = 2,453 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \end{aligned}$$

где  $\tau = \frac{T_c + 273,15}{1000} = 1,471$  °С.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		39

Энергонапряженность:

$$q_{v \max} = \frac{q_{l0} \cdot 4}{\pi \cdot (d_c^2 - d_0^2)} = \frac{4 \cdot 39,05}{3,14 \cdot (7,6^2 - 1,2^2)} = 883 \frac{MBm}{m^3}.$$

Рассчитаем распределения  $\sigma_{RR}(r)$ ,  $\sigma_{\theta\theta}(r)$  и  $\sigma_{ZZ}(r)$  на поверхности топливного сердечника:

$$\sigma_{RR} = \frac{1,59 \cdot 10^{-5} \cdot 1,58 \cdot 10^5 \cdot 8,83 \cdot 10^8}{16 \cdot 2,453 \cdot (1 - 0,316)} \cdot ((0,0039)^2 - (0,0039)^2) = 0;$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1,59 \cdot 10^{-5} \cdot 1,58 \cdot 10^5 \cdot 8,83 \cdot 10^8}{16 \cdot 2,453 \cdot (1 - 0,316)} \cdot (3 \cdot (0,0039)^2 - (0,0039)^2) = 940 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{ZZ} = \frac{1,59 \cdot 10^{-5} \cdot 1,58 \cdot 10^5 \cdot 8,83 \cdot 10^8}{16 \cdot 2,453 \cdot (1 - 0,316)} \cdot ((0,0039)^2 - \frac{1}{2} \cdot (0,0039)^2) = 628,4 \text{ МПа}.$$

Суммарное напряжение:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{ZZ} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{RR})^2 + (\sigma_{RR} - \sigma_{ZZ})^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}(628,4 - 940)^2 + (940 - 0)^2 + (0 - 628,4)^2} = 1152 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Произведем аналогичный расчет для слоя на поверхности центрального отверстия:

Модуль Юнга:

$$\begin{aligned} E &= 22,9 \cdot 10^4 - 20,1 \cdot T_c - 58,7 \cdot 10^4 \cdot P = \\ &= 22,9 \cdot 10^4 - 20,1 \cdot 1844 - 58,7 \cdot 10^4 \cdot 0,08 = 1,45 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

где  $P=0,08$  – пористость топлива.

Коэффициент термического расширения:

$$\alpha = \begin{cases} 4,83 \cdot 10^{-6} - 6,39 \cdot 10^{-10} \cdot T_i + 1,33 \cdot 10^{-12} T_i^2 - 1,76 \cdot 10^{-17} T_i^3, & \text{если } T_i \leq 923 \text{ K} \\ 1,13 \cdot 10^{-5} - 5,01 \cdot 10^{-10} \cdot T_i + 3,76 \cdot 10^{-12} T_i^2 - 6,13 \cdot 10^{-17} T_i^3, & \text{если } T_i > 923 \text{ K} \end{cases}$$

Так как  $T_c < 923 \text{ K}$ , то:

$$\alpha = 1,13 \cdot 10^{-5} - 5,01 \cdot 10^{-10} \cdot 1844 + 3,76 \cdot 10^{-12} \cdot 1844^2 - 6,13 \cdot 10^{-17} \cdot 1844^3 = 2,28 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

Теплопроводность диоксида урана с плотностью 95% от теоретической найдем по аппроксимационной формуле:

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		40

$$\lambda_c = \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot \tau + 3,6142 \cdot \tau^2} + \frac{6400}{\tau^{\frac{5}{2}}} \exp\left(-\frac{16,35}{\tau}\right) =$$

$$= \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot 1,83 + 3,6142 \cdot 1,83^2} + \frac{6400}{1,83^{\frac{5}{2}}} \exp\left(-\frac{16,35}{1,83}\right) =$$

$$= 2,066 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

где  $\tau = \frac{T_c + 273,15}{1000} = 1,83 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Рассчитаем распределения  $\sigma_{RR}(r)$ ,  $\sigma_{\theta\theta}(r)$  и  $\sigma_{ZZ}(r)$  на поверхности топливного сердечника:

$$\sigma_{RR} = \frac{2,28 \cdot 10^{-5} \cdot 1,45 \cdot 10^5 \cdot 8,83 \cdot 10^8}{16 \cdot 2,066 \cdot (1 - 0,316)} \cdot ((0,0006)^2 - (0,0039)^2) = -1917 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{2,28 \cdot 10^{-5} \cdot 1,45 \cdot 10^5 \cdot 8,83 \cdot 10^8}{16 \cdot 2,066 \cdot (1 - 0,316)} \cdot (3 \cdot (0,0006)^2 - (0,0039)^2) = -1824 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{ZZ} = \frac{2,28 \cdot 10^{-5} \cdot 1,45 \cdot 10^5 \cdot 8,83 \cdot 10^8}{16 \cdot 2,066 \cdot (1 - 0,316)} \cdot ((0,0006)^2 - \frac{1}{2} \cdot (0,0039)^2) = 628,4 \text{ МПа}.$$

Суммарное напряжение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{ZZ} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{RR})^2 + (\sigma_{RR} - \sigma_{ZZ})^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}(628,4 + 1824)^2 + (-1824 + 1917)^2 + (-1917 - 628,4)^2} = 3081 \text{ МПа}.$$

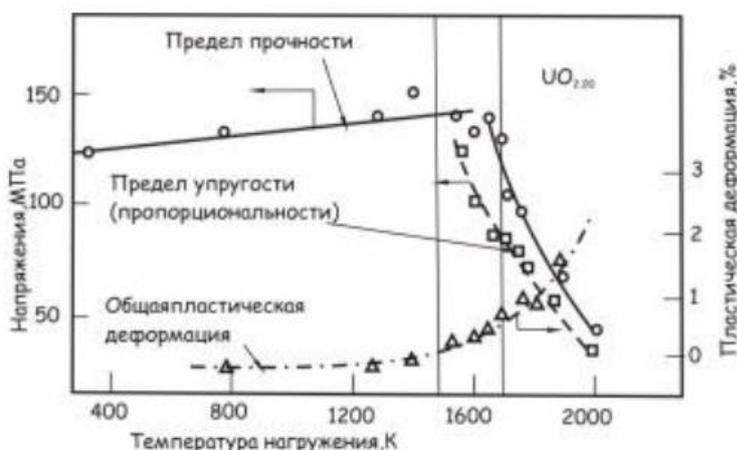


Рисунок 5 - Зависимости пределов прочности, упругости и величины общей пластической деформации диоксида урана от температуры

Топливная таблетка будет подвержена деформации и растрескиванию на периферии и около центрального отверстия.

#### 1.6.4 Термические напряжения в оболочке тепловыделяющего элемента

Предел прочности оболочки твэл:

$$\sigma_{OB.max} = \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta t_{об.max}}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot \left(1 + \frac{m}{6 + 3 \cdot m}\right),$$

где  $\Delta t_{об.max} = t_{об}^{вн} - t_{об}^{нар} = 383,2 - 340 = 43,2^\circ\text{C}$  – максимальный перепад температур на оболочке;

$m$  – параметр, определяющийся по формуле.

$$m = 1 - \frac{R_{OB.ВН}}{R_{OB.НАР}} = 1 - \frac{4,265}{4,55} = 0,063.$$

Так как толщина оболочки мала:

$$1 + \frac{m}{6 + 3 \cdot m} = 1 + \frac{0,063}{6 + 3 \cdot 0,063} = 1,01 \rightarrow \sigma_{OB.i} \approx \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta t_{1.i}}{2 \cdot (1 - \nu)}.$$

Необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\sigma_{OB.i} \leq \sigma_B,$$

где  $\sigma_B = 450 \text{ МПа}$  – предел прочности материала оболочки.

Найдем некоторые характеристики сплава Э-110 для расчета термического напряжения [12], где модуль Юнга определяется по эмпирической формуле:

$$E = 95628 - 62 \cdot \bar{T} = 95628 - 62 \cdot 361,6 = 73,2 \text{ ГПа};$$

$$\bar{T} = \frac{t_{об}^{вн} + t_{об}^{нар}}{2} = \frac{383,2 + 340}{2} = 361,6^\circ\text{C}.$$

Коэффициент Пуассона:  $\nu = 0,38$ .

Коэффициент термического расширения по эмпирической формуле:

$$\alpha = 5,671428571 + 0,001571428571 \cdot \bar{T} = 6,24 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		42

Тогда:

$$\sigma_{OB.max} = \frac{6,24 \cdot 10^{-6} \cdot 73,2 \cdot 10^9 \cdot 43,2}{2 \cdot (1 - 0,38)} = 15,9 \text{ МПа} .$$

Условие выполняется - геометрические и конструктивные параметры реактора верно выбраны.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		43

## 2 Расчет парогенератора

### 2.1 Выбор и обоснование конструктивной схемы ПГ

Парогенераторы блоков АЭС с реакторами ВВЭР-1200 – горизонтально расположенные теплообменные аппараты корпусного типа. В каждой из трех циркуляционных петель реактора ВВЭР – 1200 установлено по одному парогенератору.

Генерация и сепарация пара осуществляется в одном корпусе, который состоит из центральной (утолщённой) и двух боковых цилиндрических обечаек с приваренными к ним эллиптическими днищами. Материалом корпуса служит сталь 10ГН2МФА. По высоте он условно делится на две части. Верхняя часть предназначена для сепарации пара, а нижняя – для размещения поверхности теплообмена.

Трубный пучок теплопередающей поверхности состоит из U-образных трубок с шахматной компоновкой. Максимальная длина трубки в пучке не превышает 14 м, что позволяет применять трубы без сварных стыков. Материал труб теплопередающей поверхности – аустенитная нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Входные и выходные концы трубок завальцованы с подваркой в вертикальные коллекторы, которые вводятся в корпус через штуцера. Коллекторы и узлы их ввода – сложные конструкции. Коллекторы подвода и отвода теплоносителя, изготовленные из стали 10ГН2МФА, внутренняя поверхность которых плакирована аустенитной нержавеющей сталью 12Х18Н10Т. Трубы в пучке дистанционируются с помощью фигурных и плоских пластин, причём последние обеспечивают жёсткость дистанционирующей решётки.

Питательная вода вводится в парогенератор одной трубой называемой коллектором питательной воды. Между коллектором и корпусом ПГ имеется защитная паровая рубашка, которая предотвращает возникновение

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		44

чрезмерных температурных напряжений в толстостенных элементах.

На расстоянии 300 мм от верхнего ряда труб расположен погруженный дырчатый щит, предназначенный для выравнивания скорости выхода пара с зеркала испарения. По всему периметру к щиту приварены листы (защитные), препятствующие выходу пара из межтрубного пространства через проходы для воды.

Осадительная сепарация пара происходит в паровом объеме парогенератора – от зеркала испарения до пароприемного потолка, представляющий собой дырчатый щит и способствующий выравниванию скоростей паровых токов в сепарационном объеме.

## 2.2 Расчёт основных параметров ПГ

Таблица 2 – Технические характеристики парогенератора ПГВ-1000МКП

Давление по второму контуру, МПа	7
Температура питательной воды, °С	230
Расход теплоносителя через реактор, кг/с	17391,3
Температура теплоносителя в ПГ, °С:	
- на входе	328,9
- на выходе	298,9
Состав ПГ	Э+И

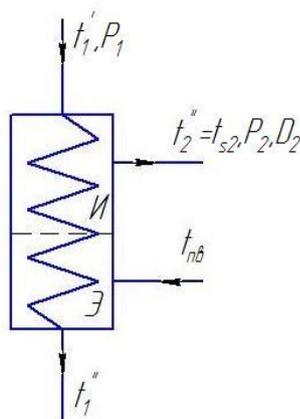


Рисунок 6 - Принципиальная тепловая схема ПГ с естественной циркуляцией

Запишем уравнение теплового баланса для парогенератора:

$$Q_{ПГ} = G \cdot (h_1' - h_1'') \cdot \eta_{ПГ} = (D + D_{np}) \cdot (h'' - h_{нс}) + D \cdot r,$$

где  $Q_{ПГ}$  – количество тепла, переданного от ТН к РТ в ПГ, МВт;

$G$ ,  $D$  и  $D_{np}$  – соответственно расход ТН, РТ и воды на продувку, кг/с;

$h_1'$  и  $h_1''$  – соответственно энтальпия ТН на входе и на выходе ПГ, кДж/кг;

$h''$  и  $h_{ПВ}$  – соответственно энтальпия РТ в состоянии насыщения (насыщенной воды) и ПВ, кДж/кг;

$\eta_{ПГ} = 0,98$  – КПД ПГ.

Значения всех энтальпий определяются по программному обеспечению “WaterSteamPro” при соответствующих параметрах:

$$h_1' = f(P_1; t_1') = 1513 \text{ кДж / кг};$$

$$h_1'' = f(P_1; t_1'') = 1335 \text{ кДж / кг};$$

$$h'' = h_2' = f(P_s = P_2) = 1267 \text{ кДж / кг};$$

$$h_{ПВ} = f(P_2; t_{ПВ}) = 945 \text{ кДж / кг};$$

$$r = f(P_s) = 1505,3 \text{ кДж / кг};$$

$$t_2'' = t_{s2} = f(P_2) = 285,8^\circ\text{C}.$$

Определим расход теплоносителя, зная расход в реакторе.

Расход теплоносителя на 2 ПГ составит:

$$G_{ПГ} = \frac{G_p}{2} = \frac{17391,3}{2} = 8695,7 \text{ кг / с}.$$

Расход теплоносителя на 3 ПГ составит:

$$G_{ПГ} = \frac{G_p}{3} = \frac{17391,3}{3} = 5797,1 \text{ кг / с}.$$

Зная расход теплоносителя определим количество тепла, переданного от ТН к РТ в ПГ, МВт.

На 2 ПГ:

$$Q_{ПГ} = G \cdot (h_1' - h_1'') \cdot \eta_{ПГ} = 8695,7 \cdot (1513 - 1335) \cdot 0,98 = 1516 \text{ МВт}.$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		46

На 3 ПГ:

$$Q_{ПГ} = G \cdot (h_1' - h_1'') \cdot \eta_{ПГ} = 5797,1 \cdot (1513 - 1335) \cdot 0,98 = 1011 \text{ МВт.}$$

Из уравнение теплового баланса для парогенератора определим расход питательной воды и продувки, кг/с.

На 2 ПГ:

$$D = \frac{Q_{ПГ}}{(h'' - h_{нс} + \alpha_{ПР} \cdot h'' - \alpha_{ПР} \cdot h_{нс} + r)} =$$
$$= \frac{1516}{(1267 - 945 + 0,003 \cdot 1267 - 0,003 \cdot 945 + 1505,3)} = 830,1 \text{ кг / с;}$$
$$D_{ПР} = D \cdot \alpha_{ПР} = 830,1 \cdot 0,003 = 2,49 \text{ кг / с,}$$

где  $\alpha_{ПР} = 0,003$  - расход воды на продувку.

На 3 ПГ:

$$D = \frac{Q_{ПГ}}{(h'' - h_{нс} + \alpha_{ПР} \cdot h'' - \alpha_{ПР} \cdot h_{нс} + r)} =$$
$$= \frac{1011}{(1267 - 945 + 0,003 \cdot 1267 - 0,003 \cdot 945 + 1505,3)} = 552,9 \text{ кг / с.}$$
$$D_{ПР} = D \cdot \alpha_{ПР} = 552,9 \cdot 0,003 = 1,67 \text{ кг / с.}$$

### 2.3 Предварительный конструкторский расчет

В горизонтальном ПГ АЭС поверхность теплообмена выполнена в виде пучка U-образных трубок, закрепленных во внутренних вертикальных коллекторах. Внутреннее пространство барабана ПГ разделено на водяной и паровой объемы условной поверхностью – зеркалом испарения ЗИ.

Осушение пароводяной смеси происходит в два этапа: за счет осадительной сепарации в паровом объеме и в результате прохождения пара через жалюзийные сепараторы ЖС. Кроме этого над теплопередающей поверхностью устанавливают: погруженный дырчатый лист (щит) ПДЛ, предназначенный для выравнивания нагрузки зеркала испарения, и пароприемный по-

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		47

толок ПП, служащий для выравнивания нагрузки парового объема.

Целью конструкторского расчета горизонтального ПП является определение основных габаритных размеров корпуса, геометрических характеристик коллекторов, дырчатых листов и т.д.

Первоначально произведем приблизительный расчет для двух парогенераторов. Расчеты для трех парогенераторов представим в сводной таблице. После расчетов сделаем вывод.

### 2.3.1 Расчет на 2 ПГ

Основные исходные данные к расчету:

- $G = 8695,7 \text{ кг} / \text{с}$ ;
- $D = 830, \text{ кг} / \text{с}$ .

Определим внутренний диаметр коллектора из уравнения неразрывности:

$$d_{BH}^K = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{TH}}{\pi \cdot \rho_{1CP} \cdot w_K}},$$

где  $w_K$  - скорость теплоносителя в коллекторе, м/с. Рекомендуется взять как в прототипе или принять в диапазоне 8...12 м/с. Принимаем  $w_K = 8 \text{ м} / \text{с}$ .

Тогда:

$$d_{BH}^K = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{TH}}{\pi \cdot \rho_{1CP} \cdot w_K}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8696}{\pi \cdot 691,8 \cdot 8}} = 1,414 \text{ м}.$$

Определим толщину стенки коллектора [13, стр. 312]:

$$\delta_K = \frac{P_{1P} \cdot d_{BH}^K}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma_H] - P_{1P}} + C;$$

где  $P_{1P} = 1,855 \text{ кгс} / \text{мм}^2$  - расчетное давление ТН;

$d_{BH}^K$  - внутренний диаметр коллектора, мм;

$\phi$  - минимальный коэффициент прочности элемента, ослабленного отверстиями или сварными швами;

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		48

$C=1$ - прибавка к расчетной толщине стенки;

$[\sigma_H]$  - номинальное допускаемое напряжение, кгс/мм<sup>2</sup>. Для стали 10ГН2МФА при  $t_{TH} = 329,7^\circ C$ ,  $[\sigma_H] \approx 19,3$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Примем коридорное расположение отверстий в камерах для присоединения труб теплопередающей поверхности, продольный шаг:  $s_{1к} = 23$  мм; поперечный шаг:  $s_{2к} = 23$  мм.

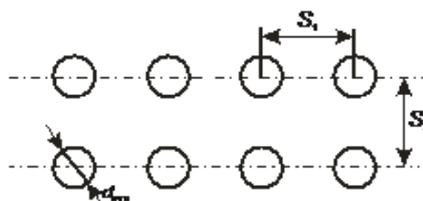


Рисунок 7 - Схема расположения отверстий

Предварительно принимаем толщину стенки камер  $\delta_k = 175$  мм.

Средний диаметр камер  $d_{с.к.} = d_{в.к.} + \delta'_k = 1598$  мм.

Поперечный шаг по средней окружности  $s_{2к.с} = \frac{s_{2к} d_{с.к.}}{d_{в.к.}} = 25,8$  мм.

Рассчитаем коэффициенты прочности камер:

- для продольного ряда  $\varphi_1 = \frac{s_{1к} - d_0}{s_{1к.с}} = 0,349$ ;

- для поперечного ряда  $\varphi_2 = \frac{2(s_{2к.с} - d_0)}{s_{2к.с}} = 0,915$ .

Для расчета принимаем меньшее:  $\varphi_1 = 0,341$ .

$$\delta_k^p = \frac{P_{1p} \cdot d_{в.к.}}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_{1p}} + C = \frac{1,855 \cdot 937}{2 \cdot 0,341 \cdot 19,3 - 1,855} + 1 = 173,2 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину камер коллектора теплоносителя 175 мм.

Наружный диаметр камер  $d_{н.к} = d_{в.к.} + 2\delta_k = 1,764$  м.

Поперечный шаг по наружной окружности  $s_{2нар} = \frac{s_{2к} d_{н.к.}}{d_{в.к.}} = 28,7$  мм.

Определим длину дуги по окружности коллектора, занятую трубками верхнего ряда, м:

$$L_{K1} = L_{OTH} \cdot \pi \cdot d_H^K = 1 \cdot \pi \cdot 1,414 = 4,442 \text{ м,}$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		49

где  $L_{отн} = 1$  - относительная длина дуги по окружности коллектора, занятая трубками верхнего ряда.

Определим число трубок в верхнем ряду, шт:

$$N_{TP1} = \frac{L_{к1}}{S_{2НАР}} = \frac{4,442}{0,0287} = 155 \text{ шт.}$$

Ширина трубного пучка на уровне верхнего ряда трубок с учетом 3-х вертикальных коридоров (для организации опускного движения воды), м:

$$B_{П} = N_{TP1} \cdot S_{2П} + 3 \cdot B_{КОР},$$

где  $B_{КОР} = 0,2$  м - ширина коридора. Первоначально принимается равной 0,1-0,2 м;

$S_{2П} = 0,0287$  м - поперечный шаг расположения трубок в пучке. Первоначально принимается равным  $S_{2НАР}$ .

Тогда:

$$B_{П} = N_{TP1} \cdot S_{2П} + 3 \cdot B_{КОР} = 155 \cdot 0,0287 + 3 \cdot 0,2 = 5,049 \text{ м.}$$

Определим расстояние между осями коллекторов, м:

$$X_{ос} = \frac{B_{П}}{2} = \frac{5,049}{2} = 2,525 \text{ м.}$$

Ширина  $B_{ПР}$  проходов (расстояние между ПДЛ и стенками корпуса ПГ), оставляемых для стока воды из условия:

$$W_{ПР} = \frac{D_{ПР}}{2 \cdot \rho_2' \cdot L_{ПДЛ} \cdot B_{ПР}} \leq 0,3,$$

где  $W_{ПР}$  - скорость стока воды с листа, м/с;

$\rho_2' = 739,7$  кг / м<sup>3</sup> - плотность насыщенной воды при давлении рабочего тела;

$D_{ПР} = (1,5 \div 1,8) \cdot D = 1,5 \cdot 829,7 = 1244,55$  кг / с - расход воды, стекающей с листа;

$L_{ПДЛ} = 8,74$  м - длина погруженного дырчатого листа, м. Первоначально принимается равной средней длине трубок;

$B_{ПР} = 0,15$  м.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		50

Тогда:

$$W_{\text{ПР}} = \frac{D_{\text{ПР}}}{2 \cdot \rho_2' \cdot L_{\text{ПДЛ}} \cdot B_{\text{ПР}}} = \frac{1,5829,7}{2 \cdot 739,7 \cdot 8,74 \cdot 0,15} = 0,6 \leq 0,3.$$

Ширина корпуса ПГ на уровне ПДЛ, м:

$$B_{\text{К.ПДЛ}} = B_{\text{ПДЛ}} + 2 \cdot B_{\text{ПР}},$$

где  $B_{\text{ПДЛ}} = (1,05 \div 1,1) \cdot B_{\text{П}} = 1,1 \cdot 5,049 = 5,554$  м. - ширина погруженного дырчатого листа.

Тогда:

$$B_{\text{К.ПДЛ}} = B_{\text{ПДЛ}} + 2 \cdot B_{\text{ПР}} = 5,554 + 2 \cdot 0,15 = 5,854 \text{ м.}$$

Высота расположения ПДЛ относительно горизонтальной оси корпуса парогенератора определяется с учетом следующих обстоятельств:

- верхний ряд труб поверхности теплообмена располагается обычно на  $h_0 = 0,15 - 0,35$  м выше горизонтальной оси ПГ;

- средний весовой уровень воды при заполнении ПГ устанавливают на  $h_1 = 0,25 \div 0,35$  м выше уровня верхнего ряда труб;

- погруженный дырчатый лист в корпусе ПГ располагается на  $h_B = 0,05 \div 0,1$  м ниже весового уровня.

Примем  $h_0 = 0,15$  м;  $h_1 = 0,25$  м;  $h_B = 0,05$  м.

Тогда искомая высота расположения ПДЛ относительно горизонтальной оси корпуса ПГ может быть найдена из соотношения:

$$h_{\text{ПДЛ}} = h_0 + h_1 - h_B = 0,15 + 0,25 - 0,05 = 0,35 \text{ м.}$$

Используя очевидные геометрические соотношения можно определить внутренний диаметр корпуса парогенератора, м:

$$D_{\text{Б.ВН}} = \sqrt{4 \cdot (h_{\text{ПДЛ}})^2 + (B_{\text{К.ПДЛ}})^2} = \sqrt{4 \cdot (0,35)^2 + (5,85)^2} = 5,919 \text{ м.}$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		51

### 2.3.2 Расчет на 3 ПГ

Основные исходные данные к расчету:

$$- G = 5797,1 \text{ кг / с};$$

$$- D = 552,9 \text{ кг / с}.$$

Методика расчета не отличается от пункта 2.3.1, полученные результаты расчета сведем в таблицу В.1.

Можно сделать вывод о том, что проектировать схему на 2 петли не целесообразно так, как с уменьшением количества петель, возрастают размеры оборудования одной петли, что может негативно сказаться на компоновке реакторного отделения. Так же важным дополнительным условием выступает при этом требование надёжного и безопасного охлаждения реактора при возможном выходе из строя отдельного оборудования. Примем техническое решение: дальнейший расчет будем вести на 3 петли.

### 2.4 Построение тепловой диаграммы

Рассчитаем мощность ПГ, используя данные по рабочему телу, МВт:

$$Q_{\text{э}} = (D + D_{\text{пр}}) \cdot (h'' - h_{\text{нс}}) = (552,9 + 552,9 \cdot 0,003) \cdot (1267 - 945) = 178,6 \text{ МВт};$$

$$Q_{\text{II}} = D \cdot r = 552,9 \cdot 1505,3 = 832,3 \text{ МВт}.$$

Из уравнения теплового баланса испарительной части ПГ:

$$Q_{\text{II}} = G \cdot (h_1' - h_{1\text{II}}) \cdot \eta_{\text{III}} = D \cdot r;$$

$$h_{1\text{II}} = h_1' - \frac{D \cdot r}{G \cdot \eta_{\text{III}}} = 1513 - \frac{552,9 \cdot 1505,3}{5797,1 \cdot 0,98} = 1367 \text{ кДж / кг}.$$

Данной энтальпии соответствует температура  $t_{1\text{II}} = 305,4^\circ\text{C}$ .

Температура воды на входе экономайзерного участка ( $t_{\text{II}}$ ) может быть определена при решении уравнения баланса теплоты при смешении двух потоков (питательная вода и вода контура естественной циркуляции):

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		52

$$D_{\text{ц}} \cdot h_{\text{ц}} = D_{\text{пв}} \cdot h_{\text{пв}} + (D_{\text{ц}} - D) \cdot h'',$$

где  $D_{\text{ц}} = D \cdot k_{\text{ц}}$  – расход воды в опускном участке контура естественной циркуляции, кг/с;

$h_{\text{ц}}$  – энтальпия соответствующая температуре  $t_{\text{ц}}$ , кДж/кг.

$$k_{\text{ц}} \cdot h_{\text{ц}} = h_{\text{пв}} + (k_{\text{ц}} - 1) \cdot h''.$$

Для рассчитываемого ПГ кратность циркуляции ( $k_{\text{ц}}$ ) рекомендуется выбирать в диапазоне от 4 до 8-10. Приняв  $k_{\text{ц}} = 6$  и рассчитав энтальпию  $h_{\text{ц}} = 1213$  кДж/кг, найдем  $t_{\text{ц}} = (P_2, h_{\text{ц}}) = 275,5$  °С.

Зная  $t''_{1H}$  и  $t_{S2}$ , определим минимальный температурный напор на выходе из испарителя:

$$\Delta t_H^{\min} = t_{1H} - t_{S2} = 305,4 - 285,8 = 19,6$$
 °С.

Оптимальное значение  $\Delta t_H^{\min}$  для парогенератора данного типа находится в пределах 10 ÷ 25 °С.

Используя полученные данные построим t-Q диаграмму для рассчитываемого парогенератора в масштабе с подписями характерных температур.

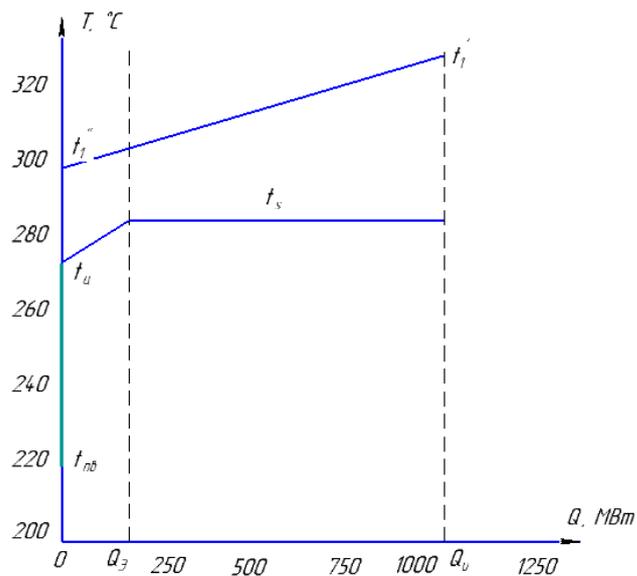


Рисунок 8 - T-Q диаграмма

## 2.5 Тепловой расчёт

Расчет позволяет найти коэффициент теплоотдачи, плотность теплового потока, коэффициент теплопередачи и площадь теплопередающей поверхности модулей парогенератора (экономайзера и испарителя). Также определяется площадь теплопередающей поверхности всего ПГ и длина его труб.

Согласно рекомендациям [15, п.12.1] выбираем следующие марки стали:

- для труб теплопередающей поверхности – 12Х18Н10Т;
- для коллектора теплоносителя – 10ГН2МФА, плакированная со стороны, омываемой теплоносителем, сталью 12Х18Н10Т;
- для элементов корпуса – 10ГН2МФА.

### 2.5.1 Расчет толщины стенок труб теплопередающей поверхности

Расчет производится с учетом всех рекомендаций и по формулам из [15, п.14.2].

Толщины стенки труб теплопередающей поверхности, мм:

$$\delta_p = \frac{P_{1p} \cdot d_H}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma] + P_{1p}} + C.$$

Расчетное давление теплоносителя:

$$P_{1p} = 0,9 \cdot 1,25 \cdot P_1 = 0,9 \cdot 1,25 \cdot 16,2 = 18,2 \text{ МПа} = 1,855 \text{ кгс/мм}^2.$$

Расчетную температуру стенки труб во входном сечении в первом приближении можно рассчитать по формуле:

$$t'_{CT.P} = 0,5 \cdot (t'_1 + t_{S2}) = 0,5 \cdot (329,7 + 285,8) = 307,8^\circ\text{C}.$$

При  $t'_{CT.P} = 307,8^\circ\text{C}$  для стали 12Х18Н10Т из [15, с.340, П.11] возьмем номинальное допускаемое напряжение  $[\sigma_H] = 15,03 \text{ кгс/мм}^2$ . Так как трубки поверхности теплообмена бесшовные, то коэффициент прочности

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		54

$\phi = 1, d_H = 14 \text{ мм.}$

Тогда:

$$\delta_p - C = \frac{1,855 \cdot 14}{2 \cdot 1 \cdot 15,03 + 1,855} = 0,814.$$

$C$  - прибавка к расчетной толщине стенки, связанная с минусовым технологическим допуском, утонением труб при изгибах и в результате коррозии:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4,$$

где  $C_1$  - прибавка к толщине на минусовой допуск.

$$C_1 = 0,11 \cdot (\delta_p - C) = 0,11 \cdot 0,814 = 0,09 \text{ мм},$$

где  $C_2$  - прибавка к расчетной толщине на утонение стенки за счет коррозионных процессов с учетом срока службы ПГ. Для аустенитных сталей эта поправка равна 0;

$C_3$  - необходимое утолщение стенки по технологическим, монтажным и другим соображениям проектирующих и изготовляющих предприятий, мм. Для труб поверхности нагрева  $C_3 = 0$ ;

$C_4$  - уменьшение толщины стенки в местах гибов труб, мм. Принимается равным наибольшему из двух значений, получаемых по формулам:

$$C_4 = \delta_p \cdot \left[ \frac{1,5 \cdot \left(\frac{a}{100}\right) - 2 \cdot \left(\frac{\delta_p}{d_H}\right)}{1,5 \cdot \left(\frac{a}{100}\right) - \frac{\delta_p}{d_H}} \right];$$

$$C_4 = \delta_p \cdot \left[ 1 - 2 \cdot \left(1 - \frac{b}{100}\right) \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{R_r}{d_H}\right) + 1}{4 \cdot \left(\frac{R_r}{d_H}\right) + 1} \right],$$

где  $R_r = (1,9 \div 3,5) \cdot d_H$  - радиус гiba трубы по нейтральной линия, мм;  $a$  - овальность трубы на гнупом участке, %;  $b$  - относительное уменьшение толщины стенки в растянутой части гнупого участка, %. Обычно принимают  $a = (5 \div 15)\%$ ,  $b = (10 \div 30)\%$  [15].  $\delta_p$  в формулы для определения  $C_4$  подставляется ориентировочно.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		55

Примем  $R_z = 2,5 \cdot d_n = 2,5 \cdot 14 = 35 \text{ мм}$ ;  $a = 12\%$ ;  $b = 20\%$ .

$$A) C_4 = \left[ \frac{1,5 \frac{a}{100} - 2 \frac{\delta_p}{d_n}}{1,5 \frac{a}{100} - \frac{\delta_p}{d_n}} \right] \delta_p = \left[ \frac{1,5 \frac{12}{100} - 2 \frac{1,5}{14}}{1,5 \frac{12}{100} - \frac{1,5}{14}} \right] \cdot 1,5 = -0,706.$$

Б)

$$C_4 = \delta_p \left[ 1 - 2 \cdot \left(1 - \frac{b}{100}\right) \cdot \frac{2(R_z / d_n) + 1}{4(R_z / d_n) + 1} \right] = 1,5 \cdot \left[ 1 - 2 \cdot \left(1 - \frac{20}{100}\right) \cdot \frac{2 \cdot (35 / 14) + 1}{4 \cdot (35 / 14) + 1} \right] = 0,191.$$

Таким образом, общая прибавка к  $\delta_p$  определится из соотношения:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 0,09 + 0 + 0 + 0,191 = 0,281 \text{ мм};$$

$$\delta_p = 0,814 + 0,281 = 1,095 \text{ мм}.$$

Из стандартного ряда принимаем значение толщины трубки поверхности теплообмена  $\delta_p = 1,5 \text{ мм}$ .

Внутренний диаметр труб:

$$d_B = d_H - 2 \cdot \delta = 14 - 2 \cdot 1,5 = 11 \text{ мм}.$$

Площадь живого сечения трубы:

$$f_{TP} = \frac{\pi \cdot d_B^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,011^2}{4} = 9,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

## 2.5.2 Число труб теплопередающей поверхности

Согласно рекомендациям [15, п.11.5] диапазон изменения скорости ТН в трубках теплопередающей поверхности  $3 \div 5 \text{ м/с}$ . Принимаем скорость теплоносителя на входе в трубки  $\omega_{1ВХ} = 5 \text{ м/с}$ .

Удельный объем теплоносителя на входе в испарительный участок:

$$v_1' = f(t_1', P_1) = 0,001527 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Из уравнения неразрывности определим число труб теплопередающей поверхности:

$$G = \frac{\omega_{1ВХ} f_{mp} n_{mp}}{v_1'}.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		56

Тогда число трубок:

$$n' = \frac{Gv_1'}{\omega_{ВХ} f_{mp}} = \frac{5797,1 \cdot 0,001527}{5 \cdot 9,5 \cdot 10^{-5}} = 18640.$$

### 2.5.3 Расчет площади теплопередающей поверхности испарительного участка ПГ

Исходные данные:

$$Q_{II} = 832,3 \text{ МВт}; \quad t'_{1II} = t'_1 = 329,7 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t''_{1II} = 305,4 \text{ }^\circ\text{C}; \\ t'_{2II} = t''_{2II} = t_{S2} = 285,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Площадь теплопередающей поверхности рассчитывается по формуле:

$$S_{II} = \frac{Q_{II}}{k_{II} \cdot \overline{\Delta t_{II}}},$$

где  $\overline{\Delta t_{II}}$  – средний температурный напор на испарительном участке;

$k_{II}$  – средний коэффициент теплоотдачи на испарительном участке.

$$\overline{\Delta t_{II}} = \frac{(t'_{1II} - t''_{2II}) - (t''_{1II} - t'_{2II})}{\ln \left[ \frac{(t'_{1II} - t''_{2II})}{(t''_{1II} - t'_{2II})} \right]} = \frac{(329,7 - 285,8) - (305,4 - 285,8)}{\ln \left[ \frac{(329,7 - 285,8)}{(305,4 - 285,8)} \right]} = 30,1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Так как отношение  $\frac{d_n}{d_s} = \frac{14}{11} \leq 2$ , то коэффициент теплоотдачи ( $k$ ) рас-

считывается по формуле:

$$k = \left[ \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + 2 \cdot R_{ок} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^{-1}.$$

Так как материал трубок поверхности нагрева аустенитная нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т, то термическое сопротивление окислов  $R_{ок} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$  [15, п.8.1, с.144].

Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке:

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		57

$$\alpha_1 = 0,021 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.43} \cdot C_t \cdot C_l,$$

где поправочные коэффициенты  $C_t$  и  $C_l$  в расчёте можно принять равными единице.

Для точности расчета теплоотдачу на испарителе будем считать для входного и выходного участков (по ТН), т.е. считаем коэффициент теплопередачи во входном сечении испарителя ( $k_{BX}$ ) и в выходном ( $k_{ВЫХ}$ ).

Коэффициенты  $k_{BX}$  и  $k_{ВЫХ}$  должны различаться не более чем на 25%, иначе будет необходимо разбивать испарительный участок ПГ пополам и считать коэффициенты теплопередачи для трех сечений вход, выход и середина. Теплоноситель движется внутри трубок, поэтому гидравлический диаметр равен внутреннему диаметру трубки поверхности нагрева ( $d_\Gamma = d_B$ ).

Рассчитаем скорости теплоносителя на входе и на выходе трубки:

$$\omega_{1BX} = \frac{G}{\rho_{1BX} \cdot n_{mp} \cdot f_{mp}} = \frac{5797,1}{655 \cdot 18640 \cdot 9,5 \cdot 10^{-5}} = 4,9 \text{ м/с};$$

$$\omega_{1ВЫХ} = \frac{G}{\rho_{1ВЫХ} \cdot n_{mp} \cdot f_{mp}} = \frac{5797,1}{716,5 \cdot 18640 \cdot 9,5 \cdot 10^{-5}} = 4,5 \text{ м/с},$$

где  $\rho_{1BX} = f(P_1; t'_1) = 655 \text{ кг/м}^3$  – плотность ТН на входе в трубки испарителя;

$\rho_{1ВЫХ} = f(P_1; t''_{1И}) = 716,5 \text{ кг/м}^3$  – плотность ТН на выходе из трубок испарителя.

Определим число Рейнольдса для входного и выходного участков:

$$\text{Re}_{BX} = \frac{\omega_{1вх} \cdot d_\Gamma}{\nu_{1BX}} = \frac{4,9 \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{1,169 \cdot 10^{-7}} = 4,6 \cdot 10^5;$$

$$\text{Re}_{ВЫХ} = \frac{\omega_{1вых} \cdot d_\Gamma}{\nu_{1ВЫХ}} = \frac{4,5 \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{1,209 \cdot 10^{-7}} = 4,09 \cdot 10^5,$$

где  $\nu_{1BX} = f(P_1; t'_1) = 1,169 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематическая вязкость на входном участке;

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		58

$\nu_{1БВХ} = f(P_1; t''_{1И}) = 1,209 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематическая вязкость на выходном участке.

Коэффициенты теплопроводности теплоносителя и критерии Прандтля:

$$\lambda_{1БХ}(P_1, t'_{1И}) = 0,497 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad \lambda_{1БВХ}(P_1, t''_{1И}) = 0,551 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\text{Pr}_{БХ}(P_1, t'_{1И}) = 1,024; \quad \text{Pr}_{БВХ}(P_1, t''_{1И}) = 0,876.$$

Найдем  $\alpha_{1БХ}$  и  $\alpha_{1БВХ}$ :

$$\alpha_{1БХ} = 0,021 \cdot \frac{0,497}{11 \cdot 10^{-3}} \cdot (4,6 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 1,024^{0,43} \cdot 1 \cdot 1 = 32500, \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К};$$

$$\alpha_{1БВХ} = 0,021 \cdot \frac{0,551}{11 \cdot 10^{-3}} \cdot (4,09 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,876^{0,43} \cdot 1 \cdot 1 = 30660 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Теплоотдача от стенки к рабочему телу в испарителе ПГ происходит в условиях кипения в большом объеме. Поэтому согласно рекомендациям [15, п.6.3, с.113] выбираем следующую формулу для расчета коэффициента теплоотдачи рабочего тела ( $\alpha_{2БХ}$ ).

Определим  $\alpha_{2БХ}$  по формуле ЦКТИ:

$$\alpha_{2БХ} = 4,32 \cdot (P_2^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot P_2^2) \cdot q^{0,7},$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$P_2$  – давление рабочего тела, МПа.

Это уравнение решают методом последовательных итераций: ориентировочно задаются значением  $q = q'$ , рассчитывают значение  $\alpha'_2$ ,  $k'_2$ , затем определяют  $q'' = k' \cdot \Delta t$ . Если выполняется условие  $0,95 \leq \frac{q'}{q''} \leq 1,05$ , то расчет заканчивается. Если условие не выполняется, то расчет продолжается и в качестве нового значения  $q$  принимается  $q''$ . Для первой итерации величина  $q'$  может быть принята равной:

$$q' = (0,7 \div 0,8) \cdot \Delta t \cdot \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + 2R_{ок} \right)^{-1},$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		59

где  $\lambda_{CT}$  – коэффициент теплопроводности, определяется по температуре стенки,  $Вт / м \cdot К$  ;

$\Delta t$  – температурный напор в соответствующем сечении испарителя,  $^{\circ}С$ .

Температуры стенки во входном и выходном сечении испарительного участка можно принять равными:

$$t_{CT}^{BX} = t_s + 0,3 \cdot (t'_{1И} - t_s) = 285,8 + 0,3 \cdot (329,7 - 285,8) = 298,9 \text{ } ^{\circ}С;$$

$$t_{CT}^{BЫX} = t_s + 0,3 \cdot (t''_{1И} - t_s) = 285,8 + 0,3 \cdot (305,4 - 285,8) = 291,7 \text{ } ^{\circ}С.$$

Коэффициенты теплопроводности стенки во входном и выходном сечении испарительного участка:

$$\lambda_{CT}^{BX} = 17,19 \text{ } Вт / м \cdot К; \quad \lambda_{CT}^{BЫX} = 17,18 \text{ } Вт / м \cdot К.$$

Температурный напор на входе и выходе испарительного участка:

$$\Delta t_{BX} = t'_1 - t_s = 329,7 - 285,8 = 43,9 \text{ } ^{\circ}С;$$

$$\Delta t_{BЫX} = t''_{1И} - t_s = 305,4 - 285,8 = 19,6 \text{ } ^{\circ}С.$$

Коэффициент теплопередачи на входном участке испарителя:

$$q' = 0,75 \cdot 43,9 \cdot \left( \frac{1}{32500} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{17,19} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \right)^{-1} = 208 \text{ } кВт / м^2.$$

Тогда:

$$\alpha'_{2BX} = 4,32 \cdot (7^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2) \cdot (208 \cdot 10^3)^{0,7} = 44260 \text{ } Вт / м^2 \cdot К;$$

$$k'_{BX} = \left[ \frac{1}{32500} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{17,19} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{44260} \right]^{-1} = 5536 \text{ } Вт / м^2 \cdot К;$$

$$q'' = k'_{BX} \cdot \Delta t = 5536 \cdot 43,9 = 243 \text{ } кВт / м^2, \quad \text{так как} \quad \frac{q'}{q''} = \frac{208}{243} = 0,856 \Rightarrow$$

Произведем вторую итерацию, примем  $q' = q'' = 243 \text{ } кВт / м^2$  :

$$\alpha'_{2BX} = 4,32 \cdot (7^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2) \cdot (243 \cdot 10^3)^{0,7} = 49350 \text{ } Вт / м^2 \cdot К;$$

$$k'_{BX} = \left[ \frac{1}{32500} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{17,19} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{49350} \right]^{-1} = 5609 \text{ } Вт / м^2 \cdot К;$$

$$q'' = k'_{BX} \cdot \Delta t = 5609 \cdot 43,9 = 246,2 \text{ } кВт / м^2, \quad \text{так как} \quad \frac{q'}{q''} = 0,957 \Rightarrow$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		60

Заканчиваем расчет и принимаем  $k_{BX} = 5609 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$ .

Аналогично определим для выходного участка:

$$q' = 0,75 \cdot 19,6 \cdot \left( \frac{1}{30660} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{17,18} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \right)^{-1} = 91,9 \text{ кВт} / \text{м}^2.$$

Тогда:

$$\alpha'_{2_{\text{ВЫХ}}} = 4,32 \cdot (7^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2) \cdot (91,9 \cdot 10^3)^{0,7} = 24990 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К};$$

$$k'_{\text{ВЫХ}} = \left[ \frac{1}{30660} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{17,19} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{24990} \right]^{-1} = 5003 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К};$$

$$q'' = k'_{\text{ВЫХ}} \cdot \Delta t = 5003 \cdot 19,6 = 98,06 \text{ кВт} / \text{м}^2,$$

$$\text{так как } \frac{q'}{q''} = \frac{91,9}{98,06} = 0,93 \Rightarrow$$

Произведем вторую итерацию, примем  $q' = q'' = 98,06 \text{ кВт} / \text{м}^2$ :

$$\alpha'_{2_{\text{ВЫХ}}} = 4,32 \cdot (7^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2) \cdot (98,06 \cdot 10^3)^{0,7} = 26150 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К};$$

$$k'_{\text{ВЫХ}} = \left[ \frac{1}{30660} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{17,19} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{26150} \right]^{-1} = 5048 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К};$$

$$q'' = k'_{\text{ВЫХ}} \cdot \Delta t = 5048 \cdot 19,6 = 98,9 \text{ кВт} / \text{м}^2, \text{ так как } \frac{q'}{q''} = \frac{98,06}{98,9} = 0,99 \Rightarrow$$

Заканчиваем расчет и принимаем  $k_{\text{ВЫХ}} = 5048 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$ . Коэффициенты  $k_{BX}$  и  $k_{\text{ВЫХ}}$  должны различаться не более чем на 25%, т.е.:

$$\frac{k_{BX} - k_{\text{ВЫХ}}}{k_{BX}} \cdot 100\% = \frac{5609 - 5048}{5609} \cdot 100\% = 10\%.$$

Определим средний коэффициент теплопередачи:

$$\bar{k}_H = \frac{k_{BX} + k_{\text{ВЫХ}}}{2} = \frac{5609 + 5048}{2} = 5329 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Определим площадь теплопередающей поверхности испарительного участка:

$$S_H = \frac{Q_H}{\bar{k}_H \cdot \Delta t_H} = \frac{832,3 \cdot 10^6}{5329 \cdot 30,1} = 5189 \text{ м}^2.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		61

## 2.5.4 Расчет площади теплопередающей поверхности экономайзерного участка ПГ

Исходные данные:

$$Q_3 = 178,6 \text{ MBm}; t'_{13} = t''_{1H} = 305,4^\circ\text{C}; t''_{13} = t'_1 = 299,7^\circ\text{C};$$
$$t'_{23} = t_{2C} = 275,5^\circ\text{C} \quad (\text{при } k_{2C} = 6);$$
$$t''_{23} = t_S = 285,8^\circ\text{C}.$$

На экономайзерный участок ПГ поступает вода, недогретая до кипения. Так как на всем участке температура теплоносителя  $t'_{13} > t_S = 270^\circ\text{C}$ , а недогрев до  $t_S$  рабочего тела относительно невелик, то теплоотдача от стенки труб к рабочему телу возможна в условиях омывания некипящей водой, если температура наружной поверхности стенки труб  $\bar{t}_{CT} < t_S$  и в условиях поверхностного кипения недогретой до  $t_S$  воды, если  $\bar{t}_{CT} > t_S$ . Теплоотдача на экономайзерном участке считается для средних температур теплоносителя и рабочего тела.

Определим средние температуры ТН и РТ:

$$\bar{t}_{13} = \frac{t'_{13} + t''_{13}}{2} = \frac{305,4 + 299,7}{2} = 302,6^\circ\text{C};$$
$$\bar{t}_{23} = \frac{t''_{23} + t'_{23}}{2} = \frac{285,8 + 275,5}{2} = 280,7^\circ\text{C};$$
$$\bar{t}_{CT} = \frac{\bar{t}_{13} + \bar{t}_{23}}{2} = \frac{302,6 + 280,7}{2} = 291,7^\circ\text{C};$$
$$291,7 > 270 \quad \text{т.е.} \quad \bar{t}_{CT} > t_S \Rightarrow$$

Теплоотдача от стенки труб к рабочему телу происходит в условиях поверхностного кипения недогретой до температуры насыщения воды.

Коэффициент теплоотдачи ТН считается для режима теплоотдачи при поверхностном кипении недогретой до температуры воды в межтрубном пространстве ПГ. Алгоритм его расчета такой же, как и на испарительном участке.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		62

Площадь теплопередающей поверхности рассчитывается по формуле [13, стр.246]:

$$S_{\text{э}} = \frac{Q_{\text{э}}}{\bar{k}_{\text{э}} \cdot \overline{\Delta t}_{\text{э}}},$$

где  $\overline{\Delta t}_{\text{э}}$  – средний температурный напор на экономайзерном участке ПГ;

$\bar{k}_{\text{э}}$  – средний коэффициент теплопередачи на экономайзерном участке ПГ.

Средний температурный напор:

$$\overline{\Delta t}_{\text{э}} = \frac{(t'_{1\text{э}} - t''_{2\text{э}}) - (t''_{1\text{э}} - t'_{2\text{э}})}{\ln \left[ \frac{(t'_{1\text{э}} - t''_{2\text{э}})}{(t''_{1\text{э}} - t'_{2\text{э}})} \right]} = \frac{(305,4 - 285,8) - (299,7 - 275,5)}{\ln \left[ \frac{305,4 - 285,8}{299,7 - 275,5} \right]} = 21,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Так как отношение  $\frac{d_n}{d_6} = 1,27 \leq 2$ , то коэффициент теплоотдачи ( $k$ )

рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{э}} = \left[ \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + 2 \cdot R_{\text{OK}} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^{-1}.$$

Так как материал трубок поверхности нагрева аустенитная нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т, то термическое сопротивление окислов примем  $R_{\text{OK}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$  [15, п.8.1, с.144].

Коэффициент теплоотдачи от ТН к стенке:

$$\alpha_1 = 0,021 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,43} \cdot C_t \cdot C_l,$$

где поправочные коэффициенты  $C_t$  и  $C_l$  в расчёте можно принять равными единице.

Теплоноситель движется внутри трубок, поэтому гидравлический диаметр равен внутреннему диаметру трубки поверхности нагрева ( $d_{\text{Г}} = d_{\text{В}}$ ).

Определим среднюю скорость ТН:

$$\overline{\omega}_{1\text{э}} = \frac{G}{\rho_{1\text{э}} \cdot n_{\text{mp}} \cdot f_{\text{mp}}} = \frac{5797,1}{722,5 \cdot 18640 \cdot 9,5 \cdot 10^{-5}} = 4,5 \text{ м / с},$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		63

где  $\overline{\rho}_{19} = f(P_1; \overline{t}_{19}) = 722,5 \text{ кг/м}^3$  – средняя плотность ТН на экономайзерном участке ПГ.

Теплофизические свойства ТН для средней температуры  $\overline{t}_{19} = 302,6 \text{ }^\circ\text{C}$ :

- $\lambda_1 = 0,556 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  – коэффициент теплопроводности;
- $\nu_1 = 1,215 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематическая вязкость;
- $\text{Pr}_1 = 0,8673$  – число Прандтля.

Определим число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{19} = \frac{\overline{\omega}_{19} \cdot d_{\Gamma}}{\nu_1} = \frac{4,5 \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{1,215 \cdot 10^{-7}} = 4,07 \cdot 10^5.$$

Найдем  $\alpha_{19}$ :

$$\alpha_{19} = 0,021 \cdot \frac{0,556}{11 \cdot 10^{-3}} \cdot (4,07 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,8331^{0,43} \cdot 1 \cdot 1 = 30160 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Теплоотдача от стенки к рабочему телу на экономайзерном участке ПГ происходит в условиях кипения в большом объеме. Поэтому согласно рекомендациям [15, п.1.8.2, с.349] выбираем следующую формулу для расчета коэффициента теплоотдачи рабочего тела ( $\alpha_{29}$ ).

Определим  $\alpha_{29}$  по формуле ЦКТИ:

$$\alpha_{2ВХ} = 4,32 \cdot (P_2^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot P_2^2) \cdot q^{0,7},$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$P_2$  – давление рабочего тела, МПа.

Это уравнение решают методом последовательных итераций. Ориентировочно задаются значением  $q = q'$ , рассчитывают значение  $\alpha'_2$ ,  $k'_2$ , затем определяют  $q'' = k' \cdot \Delta t$ . Если выполняется условие  $0,95 \leq \frac{q'}{q''} \leq 1,05$ , то расчет заканчивается. Если условие не выполняется, то расчет продолжается и в качестве нового значения  $q$  принимается  $q''$ . Для первой итерации величина  $q'$  может быть принята равной:

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		64

$$q' = (0,7 \div 0,8) \cdot \overline{\Delta t_3} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{13}} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + 2R_{OK} \right)^{-1},$$

где  $\lambda_{CT}$  – коэффициент теплопроводности, определяется по температуре стенки,  $Вт / м \cdot К$ .

Коэффициент теплопроводности стенки для средней температуры  $\overline{t_3} = 302,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$\lambda_{CT} = 19,05 \text{ } Вт / м \cdot К.$$

Коэффициент теплопередачи в первой итерации:

$$q' = 0,75 \cdot 21,9 \cdot \left( \frac{1}{30160} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{19,05} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \right)^{-1} = 108,1 \text{ } кВт / м^2.$$

Тогда:

$$\alpha'_2 = 4,32 \cdot (7^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2) \cdot (108,1 \cdot 10^3)^{0,7} = 27990 \text{ } Вт / м^2 \cdot К;$$

$$k' = \left[ \frac{1}{30160} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{19,05} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{27990} \right]^{-1} = 5330 \text{ } Вт / м^2 \cdot К;$$

$$q'' = k' \cdot \overline{\Delta t_3} = 5330 \cdot 21,9 = 116,7 \text{ } кВт / м^2, \text{ так как } \frac{q'}{q''} = 0,93 \Rightarrow$$

Произведем вторую итерацию, примем  $q' = q'' = 116,7 \text{ } кВт / м^2$ :

$$\alpha'_2 = 4,32 \cdot (7^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2) \cdot (116,7 \cdot 10^3)^{0,7} = 29530 \text{ } Вт / м^2 \cdot К;$$

$$k' = \left[ \frac{1}{30160} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{19,05} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{29530} \right]^{-1} = 5383 \text{ } Вт / м^2 \cdot К;$$

$$q'' = k' \cdot \overline{\Delta t_3} = 5383 \cdot 21,9 = 117,9 \text{ } кВт / м^2, \text{ так как } \frac{q'}{q''} = 0,99 \Rightarrow$$

Заканчиваем расчет и принимаем  $k_3 = 5383 \text{ } Вт / м^2 \cdot К$ .

Определим площадь теплопередающей поверхности экономайзерного участка:

$$S_3 = \frac{Q_3}{k_3 \cdot \Delta t_3} = \frac{178,6 \cdot 10^6}{5383 \cdot 21,9} = 1515 \text{ } м^2.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		65

## 2.5.5 Расчет площади теплопередающей поверхности ПГ и длины трубок

Так как в процессе эксплуатации ПГ возможно образование отложений, образование течей в отдельных трубках и их заглушка, то фактическая площадь теплопередающей поверхности рассчитывается с некоторым запасом, который учитывается коэффициентом запаса. Значение коэффициента запаса принимается из интервала  $1,1 \div 1,25$ . Примем коэффициент запаса по теплопередающей поверхности  $k_3 = 1,15$ .

Расчетная площадь теплопередающей поверхности:

$$S_p = S_{II} + S_{\text{э}} = 5189 + 1515 = 6704 \text{ м}^2.$$

Площадь теплопередающей поверхности ПГ:

$$S = S_p \cdot k_3 = 6704 \cdot 1,15 = 7709,6 \text{ м}^2.$$

Длина труб теплопередающей поверхности ПГ:

$$L = \frac{S}{\pi \cdot d_{CP}} = \frac{7709,6}{\pi \cdot 12,5 \cdot 10^{-3}} = 196,3 \cdot 10^3 \text{ м}.$$

Длина одной трубы:

$$l = \frac{L}{n_{TP}} = \frac{196,3 \cdot 10^3}{18640} = 10,5 \text{ м}.$$

## 2.6 конструкторский расчет и расчет на прочность отдельных узлов

### 2.6.1 Выбор материала и диаметра труб теплопередающей поверхности и коллектора ТН, материала корпуса

Согласно прототипу принимаем следующие марки стали: - для труб теплопередающей поверхности – 08X18H10T; для коллектора и элементов корпуса – 08ГН2МФА.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		66

Для надёжной обварки концов труб внутренняя поверхность коллектора плакирована антикоррозионной аустенитной наплавкой (1-й слой - ЗИО-8; 2-й слой - ЭА898/31Б).

Основные исходные данные к расчету:

- $G = 5797,1 \text{ кг / с}$ ;
- $D = 552,9 \text{ кг / с}$  – массовый расход рабочего тела в ПГ;
- $l = 10,5 \text{ м}$  - длина одной трубы.

Методика конструкторского расчета не отличается от пункта 2.3, поэтому сведем результаты уточненного конструкторского расчета в таблицу В.2.

Проверим найденное значение внутреннего диаметра ПГ с точки зрения эффективности осадительной сепарации. Определим приведенную скорость пара при проходе через зеркало испарения:

$$W_0'' = \frac{D}{\rho_2'' \cdot F_{ЗИ}},$$

где  $F_{ЗИ}$  - площадь зеркала испарения,  $\text{м}^2$ . Для парогенераторов с погруженным дырчатым листом:  $F_{ЗИ} = F_{ПДЛ} = B_{ПДЛ} \cdot L_{ПДЛ} = 4,459 \cdot 10,5 = 46,8 \text{ м}^2$  ;  
 $\rho_2'' = 36,5 \text{ кг / м}^3$  -плотность насыщенного пара при давлении рабочего тела.

Тогда:

$$w_0'' = \frac{D}{\rho_2'' \cdot F_{ЗИ}} = \frac{552,9}{36,5 \cdot 46,8} = 0,3 \text{ м / с}.$$

Определим действительный (с учетом вспухания) уровень воды над ПДЛ, м:

$$h_{Д} = \frac{h_{В}}{1 - \varphi_{В}},$$

где  $h_{В}$  – весовой уровень воды над ПДЛ, м;

$\varphi_{В}$  - истинное объемное паросодержание при барботаже пара через слой воды на ПДЛ.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		67

$\varphi_B$  рассчитывается по формуле:

$$\varphi_B = \frac{w_0''}{w_0'' + (0,65 - 0,039 p_2)} = \frac{0,3}{0,3 + (0,65 - 0,039 \cdot 5,5)} = 0,443,$$

где  $P_2 = 7 \text{ МПа}$  - давление пара.

Тогда:

$$h_D = \frac{h_B}{1 - \varphi_B} = \frac{0,05}{1 - 0,443} = 0,09 \text{ м.}$$

Определим высоту парового объема, м:

$$h_{ПО} = \frac{D_{Б.ВН}}{2} - (h_{ПДЛ} + h_D) = \frac{4,843}{2} - (0,45 + 0,09) = 1,88 \text{ м.}$$

Минимально допустимая высота парового объема должна соответствовать следующему условию  $h_{ПО} \geq 0,4 \text{ м}$ , а так, как  $1,88 > 0,4 \text{ м} \Rightarrow$  значение  $D_{Б.ВН}$  определено верно.

## 2.6.2 Определение конфигурации поперечного сечения пучка теплообменных трубок

Число рядов трубок по высоте коллектора при условии одинакового количества трубок в ряду, шт.:

$$N_P = \frac{N_{TP}}{N_{TP1}},$$

где  $N_{TP}$  - общее число трубок, шт.

$$N_P = \frac{18640}{129} = 145 \text{ шт.}$$

Определим высоту перфорированной части коллектора при условии одинакового количества трубок в рядах, м:

$$H'_K = N_P \cdot S_{1П},$$

где  $S_{1П}$  - продольный шаг расположения трубок в пучке (шаг между рядами трубок), м. Первоначально принимается равным  $S_{1П} = S_{1С} = 0,023 \text{ м}$ .

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		68

$$H'_K = 145 \cdot 0,023 = 2,34 \text{ м.}$$

Фактическая высота перфорированной части коллектора при условии неодинакового количества трубок в ряду, м:

$$H_K = R_{ОГБ} + h_0,$$

где  $R_{ОГБ} = \frac{D_{Б.ВН}}{2} - h_{ДН}$  - радиус огибающей поверхности трубного пучка, м;

$\frac{D_{Б.ВН}}{2}$  - внутренний радиус корпуса ПГ;

$h_{ДН} = 80 \div 120$  мм - расстояние нижнего ряда труб поверхности теплообмена от образующей корпуса ПГ.

Примем  $h_{ДН} = 0,08 \text{ м.}$

Тогда:

$$R_{ОГБ} = \frac{4,843}{2} - 0,08 = 2,34 \text{ м;}$$

$$H_K = 2,34 + 0,15 = 2,49 \text{ м.}$$

Значение высоты  $H_K$  должно быть не меньше ранее найденной высоты коллектора  $H'_K$  (при одинаковом количестве трубок в рядах), т.е. должно выполняться условие  $H_K \geq H'_K \Rightarrow 2,49 > 2,34$ .

Определим минимальную высоту перфорированной части коллектора, используя очевидные геометрические соотношения, м:

$$H_{К.МИН} = h_0 + \sqrt{R_{ОГБ}^2 - \frac{B_{П}^2}{4}} = 0,15 + \sqrt{2,34^2 - \frac{4,247^2}{4}} = 1,133 \text{ м.}$$

Определим площадь  $f_{1ТР}$  пучка, приходящуюся на 1 трубку, м<sup>2</sup>.

$f_{1ТР}$  для коридорной упаковки рассчитывается как:

$$f_{1ТР} = S_{1П} \cdot S_{2П} = 0,023 \cdot 0,023 = 5,29 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Определим площадь пучка, занятую только трубками (без учета коридоров):

$$F_{П} = N_{ТР} \cdot f_{1ТР} = 18640 \cdot 5,29 \cdot 10^{-4} = 9,86 \text{ м}^2.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		69

С другой стороны, эту площадь можно приближенно вычислить, используя полученные выше геометрические характеристики корпуса ПГ, размеры погруженного дырчатого листа и т.д.:

$$F_{II}' \approx \frac{\pi \cdot R_{ОГБ}^2}{2} + B_{II} \cdot h_0 - H_{К.МИН} \cdot \left( R_{ОГБ} - \frac{B_{II}}{2} \right) - 3 \cdot B_{КОР} \cdot \left( \frac{H_K + H_{К.МИН}}{2} \right) =$$

$$= \frac{\pi \cdot 2,34^2}{2} + 4,247 \cdot 0,15 - 1,133 \cdot \left( 2,34 - \frac{4,247}{2} \right) - 3 \cdot 0,3 \cdot \left( \frac{2,49 + 1,133}{2} \right) = 7,36 \text{ м}^2.$$

Если полученные площади  $F_{II} = 1,99 \text{ м}^2$  и  $F_{II}' = 2,17 \text{ м}^2$  близки по величине, то можно сделать вывод о правильности первого приближения в определении размеров ПГ.

## 2.7 Расчет на прочность

### 2.7.1 Корпус парогенератора

Корпус ПГ состоит из трех цилиндрических обечаяек (две боковые и одна центральная) и двух эллиптических днищ. Материал корпуса – сталь марки 10ГН2МФА.

Расчетное давление рабочего тела:

$$P_{2P} = 0,9 \cdot 1,25 \cdot P_2 = 0,9 \cdot 1,25 \cdot 7 = 7,88 \text{ МПа}.$$

Переведем расчетное давление РТ в другие единицы измерения:

$$P_{2P} = 7,88 \cdot 0,102 = 0,804 \text{ кгс / мм}^2.$$

Расчётная температура пара  $t_s(P_{2P}) = 285,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этой температуре для стали 10ГН2МФА  $[\sigma_H] = 19,3 \text{ кгс / мм}^2$ .

Внутренний диаметр корпуса  $D_{Б.ВН} = 4,843 \text{ м}$ .

### 2.7.2 Толщина стенок боковых обечаяек

Считаем, что имеющиеся в боковых обечайках отверстия укреплены патрубками, штуцерами или накладками. Поэтому коэффициент прочности

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
						70
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

для этих элементов корпуса  $\varphi = 1$  и  $C = 0$ :

$$\delta_P^{BO} = \frac{P_{2P} \cdot d_{BH}^K}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma_H] - P_{2P}} + C = \frac{0,804 \cdot 4843}{2 \cdot 1 \cdot 19,3 - 0,804} + 0 = 103,02 \text{ мм.}$$

Округлим до большего целого числа и примем толщину стенки боковой обечайки корпуса ПГ равной  $\delta_P^{BO} = 105 \text{ мм.}$

### 2.7.3 Толщина стенки эллиптических днищ

Считаем, что имеющиеся в двух эллиптических днищах отверстия укреплены патрубками, штуцерами или накладками. Поэтому коэффициент прочности для этих элементов корпуса  $\varphi = 1$  и  $C = 0$ :

$$\delta_P^{\text{ЭД}} = \frac{P_{2P} \cdot d_{BH}^K}{4 \cdot \phi \cdot [\sigma_H]} \cdot \frac{d_{BH}^K}{2H_d} + C,$$

где  $H_d = 0,25 \cdot d_{BH}^K = 0,25 \cdot 4,843 \cdot 10^3 = 1211 \text{ мм}$  – высота эллиптического днища.

Тогда:

$$\delta_P^{\text{ЭД}} = \frac{0,804 \cdot 4843}{4 \cdot 1 \cdot 19,3} \cdot \frac{4843}{2 \cdot 1211} = 99,85 \text{ мм.}$$

Округлим до большего целого числа и примем толщину стенок эллиптических днищ корпуса ПГ  $\delta_P^{\text{ЭД}} = 100 \text{ мм.}$

### 2.7.4 Толщина крышек люков-лазов и крышки коллектора ТН

Толщина крышек, люков-лазов и крышки коллектора теплоносителя может быть рассчитана по формуле:

$$\delta_P = \frac{K}{K_0} \cdot d \cdot \sqrt{\frac{P_P}{[\sigma_H]}},$$

где для крышек  $K = 0,6$ ;  $K_0 = 1 - 0,43 \cdot (d_0/d)$  - для крышек с отверстием при  $d_0/d \leq 0,35$ ; диаметр отверстий под болты  $d_0 = 20 \text{ мм.}$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		71

Определим толщину крышки люков-лазов. Средний диаметр окружности люков-лазов  $d = 800$  мм.

Тогда:

$$K_0 = 1 - 0,43 \cdot \frac{20}{800} = 0,989;$$

$$\delta_P^{ЛЛ} = \frac{K}{K_0} \cdot d \cdot \sqrt{\frac{P_{2P}}{[\sigma_H]}} = \frac{0,6}{0,989} \cdot 800 \cdot \sqrt{\frac{0,804}{19,3}} = 99,06 \text{ мм.}$$

Округлим до большего целого числа и получим толщину крышки люков-лазов  $\delta_P^{ЛЛ} = 100$  мм.

Определим толщину крышки коллекторов.

Диаметр отверстий под болты:  $d_0 = 20$  мм.

Средний диаметр окружности коллекторов:  $d = 937$  мм.

Расчетное давление теплоносителя:  $P_{1P} = 1,855$  кгс / мм<sup>2</sup>.

Расчётная температура ТН  $t_1 = 329,7$  °С. При этой температуре для стали 10ГН2МФА  $[\sigma_H] = 19,3$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Тогда:

$$K_0 = 1 - 0,43 \cdot \frac{20}{937} = 0,991;$$

$$\delta_P^{КР.КОЛ} = \frac{K}{K_0} \cdot d \cdot \sqrt{\frac{P_{1P}}{[\sigma_H]}} = \frac{0,6}{0,991} \cdot 937 \cdot \sqrt{\frac{1,855}{19,3}} = 174,8 \text{ мм.}$$

Округлим:  $\delta_P^{КР.КОЛ} = 175$  мм.

### 2.7.5 Система подачи питательной воды

Система подачи питательной воды состоит из тороидального коллектора, приваренных к нему двух раздающих труб и приваренных к ним отводящих трубок. Задавшись скоростью в коллекторе питательной воды и раздающих трубах (выбирается в диапазоне 5–6 м/с), определим их диаметры проходного сечения:

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		72

$$d_{BH}^{КОЛ} = \sqrt{\frac{4 \cdot D_{ПВ} \cdot \rho_{ПВ}}{W_{ПВ} \cdot n_{ТР} \cdot \pi}},$$

где  $D_{ПВ} = 554,6$  кг/с – расход питательной воды;

$\nu_{ПВ}(P_2, t_{ПВ}) = 1,184 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> / кг – удельный объем питательной воды;

$n_{ТР}$  – количество трубок, шт;

$W_{ПВ}$  – скорость питательной воды, м/с.

Скорость воды в коллекторе и раздающих трубах примем  $W_{ПВ} = 5$  м / с.

Внутренний диаметр коллектора питательной воды:

$$d_{BH}^{КОЛ} = \sqrt{\frac{4 \cdot 554,6 \cdot 1,184 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 1 \cdot \pi}} = 409 \text{ мм.}$$

Из стандартного ряда выбираем трубу  $\varnothing 426 \times 7$  мм.

Внутренний диаметр раздающих труб:

$$d_{BH}^{РАЗ} = \sqrt{\frac{4 \cdot 554,6 \cdot 1,184 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 2 \cdot \pi}} = 289 \text{ мм.}$$

Из стандартного ряда выбираем трубу  $\varnothing 325 \times 5$  мм.

Задавшись скоростью в отводящих трубках и их диаметром рассчитаем их количество:

$$n_{ОТВ.ТР} = \frac{4 \cdot D_{ПВ} \cdot \rho_{ПВ}}{W_{ОТВ.ТР} \cdot (d_{BH}^{ОТВ.ТР})^2 \cdot \pi}.$$

Скорость в отводящих трубках:

$$W_{ОТВ.ТР} = (1,3 \div 1,8) \cdot W_{ПВ} = 1,3 \cdot 5 = 6,5 \text{ м / с.}$$

Отводящие трубки диаметром  $140 \times 3$  мм  $\Rightarrow d_{BH}^{ОТВ.ТР} = 134$  мм.

Количество отводящих трубок:

$$n_{ОТВ.ТР} = \frac{4 \cdot 554,6 \cdot 1,184 \cdot 10^{-3}}{6,5 \cdot (134 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi} = 7,2 \Rightarrow 8 \text{ шт.}$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		73

## 2.8 Гидравлический расчет. Гидравлическое сопротивление при движении ТН

Потери давления от трения по длине вычисляются по формуле [13, с.122]:

$$\Delta p_{TP} = \xi_T \cdot \frac{L_K}{d_K} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}.$$

Потери давления от местных сопротивлений вычисляются по формуле:

$$\Delta p_M = \xi_M \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2},$$

где  $\xi_T$  и  $\xi_M$  – коэффициент сопротивления на трение и коэффициент местного сопротивления, соответственно;  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – скорость теплоносителя, м/с;  $d_K$  – диаметр канала, м;  $L_K$  – длина канала, м.

Поток однофазный поэтому все параметры теплоносителя берем как средние на участке. Теплофизические и геометрические характеристики, для расчета гидравлических потерь первого контура:

-  $\rho_{1BX} = 655 \text{ кг} / \text{м}^3$  – плотность ТН на входе участка;

-  $\rho_{1ВЫХ} = 728,5 \text{ кг} / \text{м}^3$  – плотность ТН на выходе участка;

-  $\bar{\rho}_1 = \frac{\rho_{1BX} + \rho_{1ВЫХ}}{2} = \frac{655 + 728,5}{2} = 691,8 \text{ кг} / \text{м}^3$  – средняя плотность

ТН на всем участке;

-  $\nu_{1BX} = 1,169 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$  – кинематическая вязкость ТН на входе участка;

-  $\nu_{1ВЫХ} = 1,22 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$  – кинематическая вязкость ТН на выходе участка;

-  $\bar{\nu}_1 = \frac{\nu_{1BX} + \nu_{1ВЫХ}}{2} = \frac{(1,169 + 1,22) \cdot 10^{-7}}{2} = 1,168 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$  – средняя кинематическая вязкость ТН на всем участке;

-  $w_{BX} = 5 \text{ м} / \text{с}$  – скорость ТН на входе участка;

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		74

-  $w_{БВХ} = 4,5 \text{ м/с}$  – скорость ТН на выходе участка;

-  $\bar{w}_1 = \frac{w_{БХ} + w_{БВХ}}{2} = \frac{5 + 4,5}{2} = 4,75 \text{ м/с}$  – средняя скорость ТН на всем

участке;

-  $w_K = 12 \text{ м/с}$  – скорость ТН в коллекторах;

-  $d_K = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – внутренний диаметр трубок;

-  $d_{BH}^K = 0,937 \text{ м}$  – внутренний диаметр коллекторов;

-  $L_K = 10,5 \text{ м}$  – длина канала.

Коэффициент трения зависит от относительной шероховатости  $\delta_{III} / r_K$ .

Для режима течения с  $Re_1 > Re_{ПЕР} \approx 120 \cdot d_K / \delta_{III}$  коэффициент трения будет:

$$\xi_T = [1,74 + 2 \cdot \lg(r_K / \delta_{III})]^{-2}.$$

Относительная шероховатость для нержавеющей стали  $\delta_{III} = 0,05 \text{ мм}$  [13, с.123].

Определим режим течения в трубках:

$$Re_1 = \frac{\bar{w}_1 \cdot d_K}{\nu_1} = \frac{3,83 \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{1,168 \cdot 10^{-7}} = 4,473 \cdot 10^5;$$

$$Re_{ПЕР} \approx 120 \cdot \frac{d_K}{\delta_{III}} = 120 \cdot \frac{11 \cdot 10^{-3}}{0,05 \cdot 10^{-3}} = 2,64 \cdot 10^4.$$

Так как  $Re_1 > Re_{ПЕР}$ , то:

$$\xi_T^{TP} = \left[ 1,74 + 2 \lg \left( \frac{5,5 \cdot 10^{-3}}{0,05 \cdot 10^{-3}} \right) \right]^{-2} = 0,019.$$

Тогда потери давления в трубках:

$$\Delta p_{TP}^{TP} = \xi_T^{TP} \cdot \frac{L_K}{d_K} \cdot \frac{\bar{\rho}_1 \cdot \bar{w}_1^2}{2} = 0,019 \cdot \frac{10,5}{0,011} \cdot \frac{691,8 \cdot 4,75^2}{2} = 141,5 \text{ кПа}.$$

Потери давления на входе в трубки ( $\xi_M^{BX} = 0,5$ ):

$$\Delta p_M^{BX} = \xi_M \cdot \frac{\rho_{1BX} \cdot w_{BX}^2}{2} = 0,5 \cdot \frac{655 \cdot 5^2}{2} = 4094 \text{ Па}.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		75

Потери давления при повороте в U – образных трубках ( $\xi_M^{ПОВ} = 0,5$ ):

$$\Delta p_M^U = \xi_M \cdot \frac{\bar{\rho}_1 \cdot \bar{w}_1^2}{2} = 0,5 \cdot \frac{691,8 \cdot 4,75^2}{2} = 3902 \text{ Па.}$$

Потери давления на выходе из трубок ( $\xi_M^{ВЫХ} = 1$ ):

$$\Delta p_M^{ВЫХ} = \xi_M \cdot \frac{\rho_{1ВЫХ} \cdot w_{ВЫХ}^2}{2} = 1 \cdot \frac{728,5 \cdot 4,5^2}{2} = 7376 \text{ Па.}$$

Суммарные гидравлические потери по первому контуру:

$$\Delta p_1 = \Sigma \Delta p_{TP} + \Sigma \Delta p_M = 141500 + 4094 + 3902 + 7376 = 156,9 \text{ кПа.}$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		76

### 3 Расчет тепловой схемы

#### 3.1 Анализ принципиальной тепловой схемы прототипа

В качестве прототипа задан энергоблок с реактором ВВЭР-1200 с турбоустановкой ОАО «Силловые Машины - ЛМЗ». Тепловая схема указанной установки показана в приложении Г.

Данная паровая турбоустановка мощностью 1200 МВт с промсепарацией и двухступенчатым перегревом пара, являясь быстроходной (рабочая частота вращения 3000 мин<sup>-1</sup>), предназначена для выработки электроэнергии в конденсационном режиме. Турбина выполнена по конструктивной схеме ЦВД+4ЦНД, где каждый цилиндр исполнен по двухпоточной конструкции.

Тепловая схема, представленная на рисунке Г.1, имеет все характерные особенности тепловых схем турбоустановок ЛМЗ для АЭС с ВВЭР большой мощности:

- развитую систему регенерации (число ступеней регенерации – 7);
- наличие одного подогревателя низкого давления смешивающего типа;
- применение закачки конденсата греющего пара пароперегревателя СПП в тракт питательной воды перед парогенератором.

Система регенерации включает в себя: 4ПНД1 + ПНД2 + ПНД3 + ПНД4 + Д + 2ПВД5 + 2ПВД6. ПНД-1,2 имеют горизонтальное исполнение, ПНД-3,4 – вертикальное. Подогреватели высокого давления являются вертикальными и расположены на одной отметке.

Закачка основного конденсата из конденсатора в деаэратор осуществляется конденсатными насосами в два подъема. Подача питательной воды из деаэратора через ПВД в парогенератор осуществляется по одноподъемной схеме питательными насосами с электроприводами (4 рабочих и

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
						77
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

1 резервный).

Закачка конденсата греющего пара второй ступени пароперегревателя СПП осуществляется в основную линию питательной воды высокотемпературным насосом с гидроприводом, слив конденсата греющего пара первой ступени пароперегревателя СПП – в ПВД-5.

ПНД-1,3 и 4 выполнены поверхностного типа, ПНД-2 – смешивающего типа. ПНД-1 выполнен в 4 корпусах, включенных параллельно друг другу, ПНД-2,3 и 4 – в одну, а ПВД-5 и 6 в две группы.

Дренаж ПВД-6 сливается самотеком в ПВД-5 и далее в деаэратор. Конденсат греющего пара ПНД-4 смешивается в сепараторе СПП, и смесь закачивается сливными насосами в линию основного конденсата перед деаэратором.

Продувка парогенератора происходит, как и на ВВЭР-1000. Пар из расширителя непрерывной продувки направляется в деаэратор, а вода из расширителя продувки направляется в подогреватель, стоящий перед деаэратором.

### **3.1.1 Обоснование схемы включения питательного насоса, тип привода питательного насоса**

Питательные насосы, подающие питательную воду в парогенерирующую установку, должны иметь давление на напоре выше давления в парогенерирующей установке на величину гидравлического сопротивления питательного тракта. Распространение получили три схемы включения питательных насосов: одноподъемная, одноподъемная с бустерным насосом и двухподъемная.

Привод питательных насосов осуществляется двумя способами: с помощью электродвигателя или турбопривода. Экономичность приводной турбины возрастает с увеличением расхода пара на турбину и ее мощности. Главное преимущество турбопривода перед электроприводом заключается

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		78

в том, что турбопривод может развивать любую мощность и большую частоту, в то время как электропривод имеет ограничение по мощности и/или не позволяет регулировать частоту вращения (в приводах с синхронными двигателями). Использование турбопривода позволяет несколько увеличить КПД станции, за счет уменьшения мощности потребителей собственных нужд, также за счет отбора пара улучшаются условия работы ЦНД. Так же одним из серьезных преимуществ турбопривода перед электроприводом заключается в том, что в аварийной ситуации при обесточивании, турбопривод продолжит работать, в то время как электропривод, работающий только от сети, остановится.

В то же время, в установках с турбоприводом не бывает несколько параллельно работающих приводов, поэтому электроприводы имеют большую надежность и безопасность. Использование турбопривода усложнит схему блока за счет дополнительных паропроводов, трубопроводов питательной воды, конденсатных насосов, это приведет к большей металлоемкости и удорожанию энергоблока. Также необходимо будет соорудить пусковую котельную на период пуска блока, что приведет к еще большим затратам. Электропривод наиболее распространен благодаря своей простоте и скорости включения, высокому КПД.

Целесообразно применить электропривод питательного насоса т.к. в настоящее время электроприводы ничем не уступают турбоприводам, однако упрощается тепловая схема, металлоемкость и расчеты.

### **3.1.2 Обоснование схемы включения конденсатного насоса**

Закачка основного конденсата из конденсатора в деаэратор осуществляется конденсатными насосами в три подъема. Так как необходимо поддерживать качество рабочего тела, ухудшающееся за счет присосов охлаждающей воды, поэтому в состав КУ войдет блочная очистная уста-

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		79

новка (БОУ). Так как расчетное давление конденсата не должно быть большим, необходимо двухподъемное включение КН. В дополнение к этому, вторым по счету подогревателем является подогреватель смешанного типа, после которого также необходимо устанавливать насос. Необходимость БОУ так же не вызывает сомнений.

В итоге в проекте будет применена трех подъемная схема включения конденсационных насосов и применение блочной обессоливающей установки.

### **3.1.3 Обоснование необходимости деаэратора и схемы включения деаэрационной установки**

Деаэраторы используются для удаления газов, находящихся в питательной воде. На АЭС является обязательным обеспечение наименьшего выхода продуктов коррозии с поверхности нагрева ПВД и трубопроводов питательного тракта для создания запаса питательной воды. Обеспечивается это установкой деаэраторов повышенного давления.

В основном используют две схемы включения деаэратора:

- подключение в качестве отдельного регенеративного подогревателя;
- подключение перед основным поверхностным подогревателем на паре того же отбора (вильчатая схема включения).

Первый способ применяется в ПТУ, предназначенной для работы в базовой части графика нагрузки с изменением мощности в небольших пределах. Такой режим не требует значительного дросселирования пара в регулирующем клапана и не оказывает заметного влияния на тепловую экономичность ПТУ. Преимущество такого подключения в том, что не требуется установка ПВД с подключением к тому же отбору турбины. Давление пара в отборе при номинальной нагрузке принимают примерно на 30% выше дав

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		80

ления пара в деаэраторе, что позволяет работать без переключения на одном и том же отборе в диапазоне нагрузок от 70 до 100%. При дальнейшем снижении нагрузки предусматривается переключение деаэратора на питание паром из вышележащего отбора. В пусковых режимах энергоблоков деаэрацию питательной воды осуществляют паром из коллектора пара «собственных нужд».

Во втором способе дросселирование пара в регулирующем клапане не оказывает влияния на экономичность ПТУ в связи с тем, что недогрев воды в деаэраторе компенсируется в ПВД, подключенном к тому же отбору пара. Этот способ широко используется для работы ПТУ в значительном диапазоне нагрузок.

С учетом преимуществ и недостатков двух методов, а также из условия задания, выберем самостоятельную схему включения деаэратора.

### **3.2 Предварительный расчет тепловой схемы на конденсационный режим**

Наличие энергоблока прототипа позволяет ориентировочно принимать некоторые решения при разработке схемы для нового энергоблока на стадии проектирования принципиальной тепловой схемы. После выбора энергоблока прототипа некоторые решения можно принимать (например, число турбин, цилиндров, ПНД и т.д.), опираясь на его схему, а некоторые корректировать в соответствии с исходными данными задания курсового проектирования (параметры пара или тип ПНД). Также при разработке схемы можно принимать собственные решения.

					<b>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		81

Таблица 3 - Исходные данные

$p_0$ , МПа	6,45
$t_0$ , °C	280,3
$p_K$ , МПа	0,005
$t_{пв}$ , °C	определить
$p_d$ , МПа	1,03
Структура турбины	ЦВД+С+ПП1-2+ЦНД
Схема включения деаэратора	самостоятельная
Число ПВД	2
Тип ПНД-1	П
Тип ПНД-2	С
$N_э^{ном}$ , МВт	1200
Месторасположение АЭС	Якутск

### 3.2.1 Определение количества ступеней в трактах высокого и низкого давления

Найдем температуры основного конденсата после каждого ПНД. Температура основного конденсата на выходе из конденсатора:

$$t_{кс} = f(p_k = 5 \text{ кПа}) = 32,8 \text{ °C}.$$

Принимаем нагрев основного конденсата в охладителях конденсата эжектора уплотнений и основного эжектора  $\Delta t_{оэ} = 2 \text{ °C}$ ,  $\Delta t_{эу} = 3 \text{ °C}$  [22, с. 186].

Тогда температура конденсата перед последним по ходу воды определяется как:

$$t_{ок}^* = t_{кс} + \Delta t_{оэ} + \Delta t_{эу} = 37,8 \text{ °C}.$$

Так как схема с самостоятельным включением деаэратора, то зададимся подогревом в деаэраторе, определим температуру в нем.

$$\Delta t_d = 15 \text{ °C} [21];$$

$$t_{дс} = f(p_d = 1,03 \text{ МПа}) = 181,2 \text{ °C};$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		82

$$h'_d = 768 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Значение давления питательной воды  $p_{пв}$  приближенно определяется как давление за питательным насосом по формуле:

$$p_{пв} = 1,3 \cdot p_0 = 1,3 \cdot 6,45 = 8,4 \text{ МПа [22, с.198].}$$

Определим повышение температуры и энтальпии в питательном насосе:

$$\Delta h_{пн} = \frac{v' \cdot (p_{пв} - p_d)}{\eta_{пн}},$$

где  $v' = 0,0011 \text{ м}^3/\text{кг}$  – удельный объем воды в состоянии насыщения при давлении деаэратора;

$\eta_{пн} = 0,82$  – КПД питательного насоса.

$$\Delta h_{пн} = \frac{v' \cdot (p_{пв} - p_d) \cdot 10^3}{\eta_{пн}} = \frac{0,0011 \cdot (8,4 - 1,03)}{0,82} = 10 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Энтальпия на входе в первый по ходу воды подогреватель высокого давления:

$$h_{пн} = h'_d + \Delta h_{пн} = 768 + 10 = 778 \text{ кДж/кг};$$

$$t_{пн} = f(p_{пв}; h_{пн}) = 182,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Тогда нагрев в питательном насосе равен:  $\Delta t_{пн} = t_{пн} - t_{дс} = 1,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Оптимальный подогрев в ПВД 25 – 35 °С [21, с.247]. Примем подогрев  $\Delta t_{пвд} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Примем количество ПВД  $z_{пвд} = 2$ .

Температура питательной воды на выходе из ПВД-1 и ПВД-2 (нумерация по отбору):

$$t_{пв2} = t_{пн} + \Delta t_{пвд} = 182,5 + 23 = 205,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{пв1} = t_{пв2} + \Delta t_{пвд} = 205,5 + 23 = 228,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Оптимальный подогрев в подогревателях низкого давления:  $\Delta t_{пнд} = 20 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$  [21, с.247].

Примем  $z_{пнд} = 4$ . Тогда подогрев основного конденсата в каждом ПНД:

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		83

$$\Delta t_{\text{ПНД}} = \frac{(t_{\text{ДС}} - \Delta t_{\text{Д}}) - t_{\text{ОК}}}{4} = \frac{(181,2 - 15) - 37,8}{4} = 32,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значения температур на выходе из подогревателей низкого давления:

$$t_{\text{ОК7}} = t_{\text{ОК}}^* + \Delta t_{\text{ПНД}} = 37,8 + 32,1 = 69,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ОК6}} = t_{\text{ОК7}} + \Delta t_{\text{ПНД}} = 69,9 + 32,1 = 102 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ОК5}} = t_{\text{ОК6}} + \Delta t_{\text{ПНД}} = 102 + 32,1 = 134,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ОК4}} = t_{\text{ОК5}} + \Delta t_{\text{ПНД}} = 134,1 + 32,1 = 166,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура насыщения в ПВД с учетом недогрева  $\Theta_{\text{ПВД}} = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$  и ПНД  $\Theta_{\text{ПНД}} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$  [22, с. 189].

$$t_{\text{S1}} = t_{\text{ПВ1}} + \Theta_{\text{ПВД}} = 228,5 + 3 = 231,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{S2}} = t_{\text{ПВ2}} + \Theta_{\text{ПВД}} = 205,5 + 3 = 208,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{S3}} = t_{\text{ДС}} = 181,2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{S4}} = t_{\text{ОК4}} + \Theta_{\text{ПНД}} = 166,2 + 2 = 168,2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{S5}} = t_{\text{ОК5}} + \Theta_{\text{ПНД}} = 134,1 + 2 = 136,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{S6}} = t_{\text{ОК6}} = 102 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{S7}} = t_{\text{ОК7}} + \Theta_{\text{ПНД}} = 69,9 + 2 = 71,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Давление насыщения в каждом РППВ:

$$p_{\text{S1}}(t_{\text{S1}}) = 2,87 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{S2}}(t_{\text{S2}}) = 1,85 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{S3}}(t_{\text{S3}}) = 1,03 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{S4}}(t_{\text{S4}}) = 663 \text{ кПа};$$

$$p_{\text{S5}}(t_{\text{S5}}) = 323 \text{ кПа};$$

$$p_{\text{S6}}(t_{\text{S6}}) = 108 \text{ кПа};$$

$$p_{\text{S7}}(t_{\text{S7}}) = 33 \text{ кПа}.$$

Давление в каждом отборе [22, с.190]:

$$p_1 = 1,05 \cdot p_{\text{S1}} = 3,01 \text{ МПа};$$

$$p_2 = 1,05 \cdot p_{\text{S2}} = 1,94 \text{ МПа};$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		84

$$p_3 = 1,05 \cdot p_{s3} = 1,08 \text{ МПа};$$

$$p_4 = 1,05 \cdot p_{s4} = 696 \text{ кПа};$$

$$p_5 = 1,05 \cdot p_{s5} = 339 \text{ кПа};$$

$$p_6 = 1,05 \cdot p_{s6} = 113 \text{ кПа};$$

$$p_7 = 1,05 \cdot p_{s7} = 34,7 \text{ кПа}.$$

### 3.2.2 Определение параметров пара и воды в элементах турбоустановки

Параметры пара до стопорного и регулирующего клапанов:

$$p_0 = 6,79 \text{ МПа}; t_0 = f(p_0) + 30 = 313,8 \text{ }^\circ\text{C}; h_0 = f(p_0, t_0) = 2903 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Учитывая потери в стопорном и регулирующем клапанах, параметры на входе в часть высокого давления будут:

$$p_{\text{чвд}} = 0,96 \cdot 6,79 = 6,5 \text{ МПа}; h_{\text{чвд}} = h_0 = 2903 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$t_{\text{чвд}} = f(p_{\text{чвд}}, h_{\text{чвд}}) = 310,5 \text{ }^\circ\text{C}; s_{\text{чвд}} = f(p_{\text{чвд}}, h_{\text{чвд}}) = 6,07 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}.$$

Процесс расширения перегретого пара в ЧВД.

Параметры пара на линии насыщения в конце теоретического процесса расширения в перегретом паре:

$$p_{\text{чвд.пп}} = f(s_{\text{чвд}}, x = 1) = 3,99 \text{ МПа}; h_{\text{чвд.ппт}} = f(p_{\text{чвд.пп}}, s_{\text{чвд}}) = 2801 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Теплоперепад с учетом потерь:

$$H_{\text{чвд.пп}} = (h_{\text{чвд}} - h_{\text{чвд.ппт}}) \cdot \eta_{\text{чвд}}^{\text{пп}} = (2903 - 2801) \cdot 0,862 = 88 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительные параметры в конце процесса расширения в перегретом паре:

$$h_{\text{чвд.пп}} = h_{\text{чвд}} - H_{\text{чвд.пп}} = 2903 - 88 = 2815 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$s_{\text{чвд.пп}} = f(p_{\text{чвд.пп}}, h_{\text{чвд.пп}}) = 6,098 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}.$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		85

Параметры пара в первом отборе при теоретическом процессе расширения в зоне влажного пара:

$$h_{1t} = f(p_1, s_{\text{чвд.пп}}) = 2759 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, x_{1t} = f(p_1, s_{\text{чвд.пп}}) = 0,975.$$

Коэффициент учитывающий влияние влажности на КПД:

$$k_{\text{вл}} = 1 - a_{\text{вл}} \cdot \left[ 1 - \frac{(1 + x_{1t})}{2} \right] = 1 - 0,72 \cdot \left[ 1 - \frac{(1 + 0,975)}{2} \right] = 0,991.$$

Действительный теплоперепад, срабатываемый паром до первого отбора в зоне влажного пара:

$$H_{1\text{вл}} = (h_{\text{чвд.пп}} - h_{1t}) \cdot \eta_{\text{чвд}}^{\text{пп}} \cdot k_{\text{вл}} = (2801 - 2759) \cdot 0,862 \cdot 0,991 = 36 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительные параметры пара первого отбора:

$$h_1 = h_{\text{чвд.пп}} - H_{1\text{вл}} = 2815 - 36 = 2779 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$s_1 = f(p_1, h_1) = 6,137 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}; x_1 = f(p_1, s_1) = 0,987.$$

Параметры пара во втором отборе при теоретическом процессе расширения:

$$h_{2t} = f(p_2, s_1) = 2694 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, x_{2t} = f(p_2, s_1) = 0,945$$

Коэффициент учитывающий влияние влажности на КПД:

$$k_{\text{вл}} = 1 - a_{\text{вл}} \cdot \left[ 1 - \frac{(x_{1t} + x_{2t})}{2} \right] = 1 - 0,72 \cdot \left[ 1 - \frac{(0,975 + 0,945)}{2} \right] = 0,971.$$

Действительный теплоперепад, срабатываемый паром до второго отбора:

$$H_2 = (h_1 - h_{2t}) \cdot \eta_{\text{чвд}}^{\text{пп}} \cdot k_{\text{вл}} = (2779 - 2694) \cdot 0,862 \cdot 0,971 = 71 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительные параметры пара второго отбора:

$$h_2 = h_1 - H_2 = 2779 - 71 = 2708 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		86

$$s_2 = f(p_2, h_2) = 6,165 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}; x_2 = f(p_2, s_2) = 0,953.$$

Параметры пара в третьем отборе при теоретическом процессе расширения:

$$h_{3t} = f(p_3, s_2) = 2600 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, x_{3t} = f(p_3, s_2) = 0,91.$$

Коэффициент учитывающий влияние влажности на КПД:

$$k_{\text{вл}} = 1 - a_{\text{вл}} \cdot \left[ 1 - \frac{(x_{2t} + x_{3t})}{2} \right] = 1 - 0,72 \cdot \left[ 1 - \frac{(0,945 + 0,91)}{2} \right] = 0,948.$$

Действительный теплоперепад, срабатываемый паром до третьего отбора:

$$H_3 = (h_2 - h_{3t}) \cdot \eta_{\text{чвд}}^{\text{пп}} \cdot k_{\text{вл}} = (2708 - 2600) \cdot 0,862 \cdot 0,948 = 88 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительные параметры пара третьего отбора:

$$h_3 = h_2 - H_3 = 2708 - 88 = 2620 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$s_3 = f(p_3, h_3) = 6,208 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}; x_3 = f(p_3, s_3) = 0,92.$$

Совместим разделительное давление с четвертым отбором.

$$p_{\text{разд}} = p_4 = 0,696 \text{ МПа}.$$

Параметры пара на выходе из ЧВД при теоретическом процессе расширения:

$$h_{4t} = f(p_4, s_3) = 2543 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, x_{4t} = f(p_4, s_3) = 0,894.$$

Коэффициент учитывающий влияние влажности на КПД:

$$k_{\text{вл}} = 1 - a_{\text{вл}} \cdot \left[ 1 - \frac{(x_{3t} + x_{4t})}{2} \right] = 1 - 0,72 \cdot \left[ 1 - \frac{(0,91 + 0,894)}{2} \right] = 0,929.$$

Действительный теплоперепад, срабатываемый паром до третьего отбора:

$$H_4 = (h_3 - h_{4t}) \cdot \eta_{\text{чвд}}^{\text{пп}} \cdot k_{\text{вл}} = (2620 - 2543) \cdot 0,862 \cdot 0,929 = 62 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		87

Действительные параметры пара третьего отбора:

$$h_4 = h_3 - H_4 = 2620 - 62 = 2558 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$s_4 = f(p_4, h_4) = 6,242 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}; x_4 = f(p_4, s_4) = 0,901.$$

Параметры пара после сепаратора:

$$p_c = 0,98 \cdot p_{\text{разд}} = 0,98 \cdot 0,696 = 0,68 \text{ МПа}; t_c = f(p_c) = 163,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$x_c = 0,995; h_c = f(t_c, x_c) = 2751 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия дренажа сепаратора:

$$h_{\text{др.с}} = f(t_c, x = 0) = 692 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Параметры дренажа греющего пара ПП1:

$$t_{\text{др.пп1}} = f(p'_1) = 231,4 \text{ }^\circ\text{C}; h_{\text{др.пп1}} = f(t_{\text{др.пп1}}, x = 0) = 997 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Параметры пара после ПП1.

Температурный напор в ПП1 примем  $\delta t_{\text{пп1}} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$t_{\text{пп1}} = t_{\text{др.пп1}} - \delta t_{\text{пп1}} = 231,4 - 17 = 214,4 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p_{\text{пп1}} = 0,98 \cdot p_c = 0,98 \cdot 0,68 = 0,66 \text{ МПа};$$

$$h_{\text{пп1}} = f(p_{\text{пп1}}, t_{\text{пп1}}) = 2879 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Подогрев пара составляет:

$$\Delta t_{\text{пп1}} = t_{\text{пп1}} - t_c = 214,4 - 163,8 = 50,6.$$

Отбор пара в ПП2 осуществляется из линии свежего пара до регулирующего и стопорного клапана.

Параметры дренажа греющего пара ПП2:

$$t_{\text{др.пп2}} = f\left(\frac{p_0}{1,03}\right) = 281,8 \text{ }^\circ\text{C}; h_{\text{др.пп2}} = f(t_{\text{др.пп2}}, x = 0) = 1246 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Параметры пара после ПП2.

Температурный напор в ПП2 примем  $\delta t_{\text{пп2}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$t_{\text{пп2}} = t_{\text{др.пп2}} - \delta t_{\text{пп2}} = 281,8 - 20 = 261,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		88

$$p_{пп2} = 0,98 \cdot p_{пп1} = 0,98 \cdot 0,66 = 0,65 \text{ МПа};$$

$$h_{пп2} = f(p_{пп2}, t_{пп2}) = 2981 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Подогрев пара составляет:

$$\Delta t_{пп2} = t_{пп2} - t_{пп1} = 261,8 - 214,4 = 47,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Учитывая потери в отсечном клапане, параметры на входе в часть низкого давления будут:

$$p_{чнд} = 0,98 \cdot 0,65 = 0,64 \text{ МПа}; h_{чнд} = h_{пп2} = 2981 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$s_{чнд} = f(p_{чнд}, h_{чнд}) = 7,198 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Процесс расширения перегретого пара в ЧНД до пятого отбора идет полностью в зоне перегретого пара.

Параметры пара в пятом отборе при теоретическом процессе расширения:

$$h_{5t} = f(p_5, s_{чнд}) = 2838 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительный теплоперепад, срабатываемый паром до пятого отбора:

$$H_5 = (h_{чнд} - h_{5t}) \cdot \eta_{чнд}^{пп} = (2981 - 2838) \cdot 0,83 = 119 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительные параметры пара пятого отбора:

$$h_5 = h_{чнд} - H_5 = 2981 - 119 = 2862 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; s_5 = f(p_5, h_5) = 7,249 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Параметры пара на линии насыщения в конце теоретического процесса расширения в перегретом паре:

$$p_{чнд,пп} = f(s_5, x = 1) = 0,139 \text{ МПа};$$

$$h_{чнд,ппt} = f(p_{чнд,пп}, s_5) = 2690 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Теплоперепад с учетом потерь:

$$H_{чнд,пп} = (h_5 - h_{чнд,ппt}) \cdot \eta_{чнд}^{пп} = (2862 - 2690) \cdot 0,83 = 143 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		89

Действительные параметры в конце процесса расширения в перегретом паре:

$$h_{\text{чнд.пп}} = h_5 - H_{\text{чнд.пп}} = 2862 - 143 = 2719 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$s_{\text{чнд.пп}} = f(p_{\text{чнд.пп}}, h_{\text{чнд.пп}}) = 7,324 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Параметры пара в шестом отборе при теоретическом процессе расширения в зоне влажного пара:

$$h_{6t} = f(p_6, s_{\text{чнд.пп}}) = 2683 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительный теплоперепад, срабатываемый паром до шестого отбора:

$$H_6 = (h_{\text{чнд.пп}} - h_{6t}) \cdot \eta_{\text{чнд}}^{\text{пп}} = (2719 - 2683) \cdot 0,83 = 30 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительные параметры пара шестого отбора:

$$h_6 = h_{\text{чнд.пп}} - H_{6\text{вл}} = 2719 - 30 = 2689 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$s_6 = f(p_6, h_6) = 7,341 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Параметры пара в седьмом отборе при теоретическом процессе расширения:

$$h_{7t} = f(p_7, s_6) = 2500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, x_{7t} = f(p_7, s_6) = 0,944.$$

Коэффициент учитывающий влияние влажности на КПД:

$$k_{\text{вл}} = 1 - a_{\text{вл}} \cdot \left[ 1 - \frac{(x_{6t} + x_{7t})}{2} \right] = 1 - 0,72 \cdot \left[ 1 - \frac{(1 + 0,932)}{2} \right] = 0,976.$$

Действительный теплоперепад, срабатываемый паром до седьмого отбора:

$$H_7 = (h_6 - h_{7t}) \cdot \eta_{\text{чнд}}^{\text{пп}} \cdot k_{\text{вл}} = (2689 - 2500) \cdot 0,83 \cdot 0,976 = 153 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительные параметры пара седьмого отбора:

$$h_7 = h_6 - H_7 = 2689 - 153 = 2536 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		90

$$s_7 = f(p_7, h_7) = 7,445 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}; x_7 = f(p_7, h_7) = 0,959.$$

Параметры пара на выходе из ЧНД в теоретическом процессе расширения:

$$h_{kt} = f(1,02 \cdot p_k, s_7) = 2273 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; x_{kt} = f(1,02 \cdot p_k, s_7) = 0,881.$$

Коэффициент учитывающий влияние влажности на КПД:

$$k_{\text{влк}} = 1 - a_{\text{вл}} \cdot \left[ 1 - \frac{(x_{7t} + x_{kt})}{2} \right] = 1 - 0,72 \cdot \left[ 1 - \frac{(0,944 + 0,881)}{2} \right] = 0,937.$$

Действительны теплоперепад срабатываемый в ЧНД до выхлопа:

$$H_k = (h_7 - h_{kt}) \cdot \eta_{\text{ЧНД}}^{\text{пп}} \cdot k_{\text{влк}} = (2536 - 2273) \cdot 0,83 \cdot 0,937 = 204 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Действительные параметры пара на выходе из ЧВД:

$$h_k = h_7 - H_k = 2536 - 204 = 2332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$s_k = f(1,02 \cdot p_k, h_k) = 7,638 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}; x_k = f(1,02 \cdot p_k, h_k) = 0,905.$$

Условие выполняется так, как погрешность составляет менее 1%.

Действительный теплоперепад, срабатываемый в турбине:

$$H_i = h_{\text{чвд}} - h_4 + h_{\text{чнд}} - h_k = 2903 - 2558 + 2981 - 2332 = 994 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Процесс расширения пара в турбине представлен в приложение Г.

### 3.3 Предварительная проверка на индифферентную точку

Предварительная проверка на индифферентную точку [22, с. 666]:

$$\Delta h_{\text{инд}} = \alpha_{\text{пп}} \Delta h_{\text{пп}} \frac{H_{\text{р.ВД}}}{h_0 - h_{\text{пв}}}.$$

В первом приближении примем:

$$\alpha_{\text{пп}} = 0,8 \text{ — доля пара, пошедшая на перегрев;}$$

$$\Delta h_{\text{пп}} = h_{\text{пп}} - h_c = 2879 - 2751 = 121 \text{ кДж/кг — теплота, расходует}$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		91

мая в ПТУ на промежуточный перегрев.

$h_{пв} = h_{пв1} = 984$  кДж/кг – энтальпия после последнего ПВД по ходу воды;

Тогда  $H_{р.ВД} = h_0 - h_1 + (1 - \alpha_1) \cdot (h_1 - h_2) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h_2 - h_3) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \cdot (h_3 - h_{разд}) = 2903 - 2779 + 0,95 \cdot (2779 - 2708) + 0,9 \cdot (2708 - 2620) + 0,85 \cdot (2620 - 2558) = 323 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

$$\Delta h_{инд} = 0,8 \cdot 121 \cdot \frac{323}{2903 - 984} = 16 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Так как  $\Delta h_{инд} < h_{пп} - h_5 = 1$  кДж/кг, то использование регенеративного подогревателя П5 увеличивает тепловую экономичность ПТУ.

Принципиальная схема рассчитываемой установки и таблица параметров воды и пара в ключевых точках представлены в приложение Г.

### 3.4 Расчет тепловой схемы энергоблока

#### 3.4.1 Уравнение материального и теплового баланса вспомогательных элементов тепловой схемы

Расширитель непрерывной продувки.

Цель расчета расширителя заключается в определении относительных расходов пара  $\alpha_p$  и воды  $\alpha_s$  по принятому расходу продувочной воды  $\alpha_{пр}$  на основе решения уравнений материального и теплового балансов. Схема расширителя непрерывной продувки ПГ представлена на рисунке Г.4.

$$\begin{cases} \alpha_{пр} = \alpha_{п} + \alpha_{в}; \\ \alpha_{пр} \cdot h'_{пр} \cdot \eta_p = \alpha_{п} \cdot h''_p + \alpha_{в} \cdot h'_v, \end{cases}$$

где  $\alpha_{пр} = 0,005$  - относительный расход продувочной воды, принимается из рекомендуемого диапазона 0,005 - 0,03;

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		92

$h'_{\text{пр}} = f(p_{\text{пг}}) = 1336$  кДж/кг - энтальпия продувочной воды, определяется для состояния насыщения при давлении в парогенераторе  $p_{\text{пг}} = 1,2 \cdot p_0 = 8,71$  МПа;

$h'_p = 778$  кДж/кг;  $h''_p = 2780$  кДж/кг - энтальпии пара и воды на выходе из расширителя, определяются для состояния насыщения при давлении в расширителе, которое из-за гидравлических потерь в трубопроводе на 2...8% выше давления в деаэраторе,  $p_p = 1,05 \cdot p_d = 1,05 \cdot 1,03 = 1,08$  МПа;  $\eta_p = 0,99$  - КПД расширителя.

$$\begin{cases} 0,005 = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{в}}; \\ 0,005 \cdot 1336 \cdot 0,99 = \alpha_{\text{п}} \cdot 2780 + \alpha_{\text{в}} \cdot 778. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha_{\text{п}} = 0,0014; \\ \alpha_{\text{в}} = 0,0036. \end{cases}$$

Давление продувочной воды, идущей в П4:

$$p_{\text{в}} = p_4 = 0,696 \text{ МПа.}$$

Температура продувочной воды, идущей в П4:

$$t_{\text{в}} = t_s(p_p) - \Theta_p = 183,3 - 15 = 168,3 \text{ }^\circ\text{C,}$$

где  $t_s(p_p)$  - температура насыщения при давлении  $p_p$  в расширителе;

$\Theta_p$  - температурный напор в охладителе продувки, примем  $\Theta_p = 15^\circ\text{C}$ .

$$h_{\text{в}} = f(t_{\text{в}}; p_{\text{в}}) = 693 \text{ кДж/кг.}$$

Охладители эжекторов (ОЭ) и уплотнений (ОУ).

Они служат для конденсации пара из эжекторов и уплотнений турбины, при этом проходящий через них основной конденсат  $\alpha_{\text{ок}}$  подогревается.

$$t_{\text{ок}}^* = t_{\text{кс}} + \Delta t_{\text{оэ}} + \Delta t_{\text{эу}} = 32,8 + 2 + 3 = 37,8 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Энтальпия основного конденсата после ОЭ и ЭУ:

$$h_{\text{ок}}^* = 4,19 \cdot 37,8 = 158 \text{ кДж/кг.}$$

Сепаратор.

Он производит осушку пара, отработавшего в ЦВД. Расчетная схема двухступенчатого сепаратора-пароперегревателя показана на рисунке Г.5.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		93

Относительный расход сепарата, отводимого из сепаратора:

$$\alpha_c = \frac{x_{\text{ВЫХ}} - x_{\text{ВХ}}}{x_{\text{ВЫХ}}} \cdot \alpha_{\text{ЦВД}}^{\text{ВЫХ}},$$

где  $x_{\text{ВЫХ}}$ ,  $x_{\text{ВХ}}$  – значения степени сухости пара на выходе из сепаратора и на входе в него.

$$x_{\text{ВЫХ}} = 0,995;$$

$$x_{\text{ВХ}} = 0,901.$$

$\alpha_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦВД}} = 1 - \sum \alpha_j^{\text{ЦВД}}$  – относительный расход пара на выходе из ЦВД (на входе в сепаратор);

$\sum \alpha_j^{\text{ЦВД}} = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_{\text{ПП1}}$  – сумма относительных расходов пара в отборы ЦВД.

Пароперегреватель (ПП1 и ПП2).

Тепловой баланс первой ступени перегревателя:

$$\alpha_{\text{ПП1}} \cdot (h_1 - h'_{\text{ПП1}}) \cdot \eta_{\text{ПП}} = \alpha_{\text{ЦНД}} \cdot (h_{\text{ПП}}^* - h_c),$$

где  $\alpha_{\text{ЦНД}} = \alpha_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦВД}} - \alpha_c$  – относительный расход пара на входе в ЦНД.

Тепловой баланс второй ступени перегревателя:

$$\alpha_{\text{ПП2}} \cdot (h_0 - h'_{\text{ПП2}}) \cdot \eta_{\text{ПП}} = \alpha_{\text{ЦНД}} \cdot (h_{\text{ПП}} - h_{\text{ПП}}^*),$$

где  $\alpha_{\text{ПП1}}$  – относительный расход греющего пара из отбора на первую ступень ПП;

$\eta_{\text{ПП}} = 0,98$  – КПД промежуточного пароперегревателя (поверхностного подогревателя). Принимается равным 0,98 [21, с. 215];

$\alpha_{\text{ПП2}}$  – относительный расход свежего пара на вторую ступень ПП.

### 3.4.2 Общие уравнения материального баланса

Материальные балансы по пару.

Относительный расход пара на турбоустановку АЭС определяется как:

$$\alpha_{\text{ТУ}} = 1 + \alpha_{\text{ПП2}}.$$

					<b>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		94

Относительный расход пара из парогенерирующей установки равен:

$$\alpha_{\text{пг}} = \alpha_{\text{ту}} + \alpha_{\text{ут}} + \alpha_{\text{упл}},$$

где  $\alpha_{\text{упл}} = 0,005 - 0,012$  – относительный расход пара на уплотнений турбины [21, с.216]. Примем  $\alpha_{\text{упл}} = 0,01$ .

$\alpha_{\text{ут}}$  – относительный расход утечек. Принимается  $\alpha_{\text{ут}} = 0,01$  [21, с.217].

Материальные балансы по воде.

Относительный расход питательной воды в парогенерирующую установку определяется как:

$$\alpha_{\text{пв}} = \alpha_{\text{пг}} + \alpha_{\text{пр}} = 1 + \alpha_{\text{ут}} + \alpha_{\text{упл}} + \alpha_{\text{пп2}} + \alpha_{\text{пр}}.$$

Материальный баланс добавочной воды:

$$\alpha_{\text{дв}} = \alpha_{\text{ут}} = 0,014.$$

### 3.4.3 Уравнения материального и теплового балансов теплообменников регенеративной системы

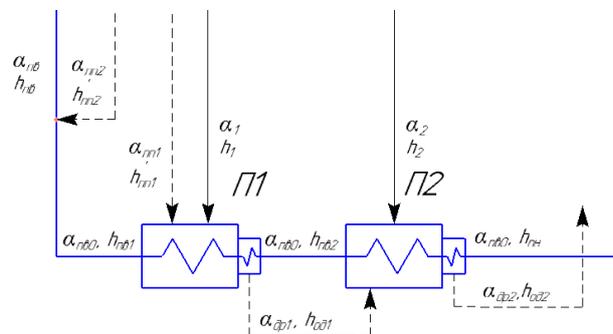


Рисунок 9 - Расчетная схема тректа питательной воды

Точка смешения:

$$\begin{cases} \alpha_{\text{пв0}} \cdot h_{\text{пв1}} + \alpha_{\text{пп2}} \cdot h'_{\text{пп2}} = \alpha_{\text{пв}} \cdot h_{\text{пв}}; \\ \alpha_{\text{пв}} = \alpha_{\text{пв0}} + \alpha_{\text{пп2}}. \end{cases}$$

П1:

$$\begin{cases} \eta_{\text{п}} \cdot (\alpha_{\text{пп1}} \cdot (h'_{\text{пп1}} - h_{\text{од1}}) + \alpha_1 \cdot (h_1 - h_{\text{од1}})) = \alpha_{\text{пв0}} \cdot (h_{\text{пв1}} - h_{\text{пв2}}); \\ \alpha_{\text{др1}} = \alpha_1 + \alpha_{\text{пп1}}. \end{cases}$$

Примем  $\eta_{\text{п}} = 0,98$  – КПД поверхностного подогревателя [22, с. 220].

						Лист
						95
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	

П2:

$$\begin{cases} \eta_{\text{п}} \cdot (\alpha_{\text{др1}} \cdot (h_{\text{од1}} - h_{\text{од2}}) + \alpha_2 \cdot (h_2 - h_{\text{од2}})) = \alpha_{\text{пв0}} \cdot (h_{\text{пв2}} - h_{\text{пн}}); \\ \alpha_{\text{др2}} = \alpha_{\text{др1}} + \alpha_2. \end{cases}$$

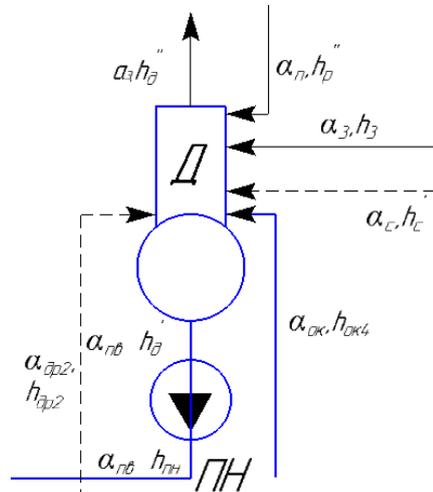


Рисунок 10 - Расчетная схема деаэратора

Д:

$$\begin{cases} \eta_{\text{с}} \cdot (\alpha_{\text{др2}} \cdot h_{\text{од2}} + \alpha_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}'' + \alpha_3 \cdot h_3 + \alpha_{\text{с}} \cdot h_{\text{с}}' + \alpha_{\text{ок2}} \cdot h_{\text{пнд4}}) = \\ = \alpha_{\text{пв0}} \cdot h_{\text{д}}' + \alpha_{\text{э}} \cdot h_{\text{д}}''; \\ \alpha_{\text{пв0}} = \alpha_{\text{ок2}} + \alpha_{\text{с}} + \alpha_3 + \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{др2}} - \alpha_{\text{э}}. \end{cases}$$

Примем  $\eta_{\text{с}} = 0,99$  – КПД смешивающего подогревателя [22, с. 221].

$\alpha_{\text{э}}$  – относительный расход пара на эжекторы. Принимается: 0,002 – 0,003 [21, с.217]. Примем  $\alpha_{\text{э}} = 0,003$ .

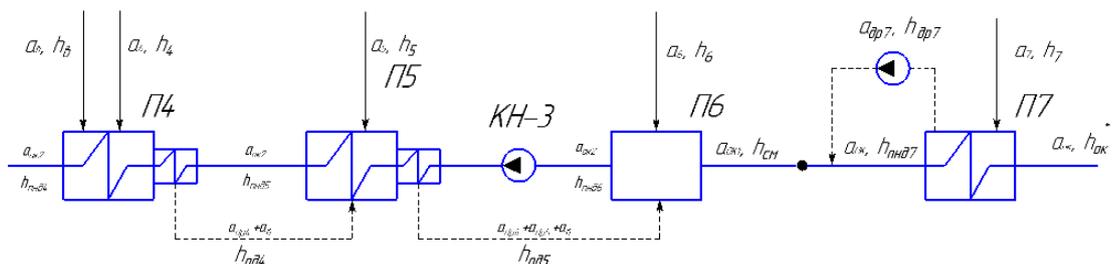


Рисунок 11 - Расчетная схема тракта основного конденсата

П4:

$$\begin{cases} \eta_{\text{п}} \cdot (\alpha_{\text{в}} \cdot (h_{\text{в}} - h_{\text{од4}}) + \alpha_4 \cdot (h_4 - h_{\text{од4}})) = \alpha_{\text{ок2}} \cdot (h_{\text{пнд4}} - h_{\text{пнд5}}); \\ \alpha_{\text{др4}} = \alpha_{\text{в}} + \alpha_4. \end{cases}$$

П5:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{п}} \cdot \left( (\alpha_{\text{др4}} + \alpha_{\text{в}}) \cdot (h_{\text{од4}} - h_{\text{од5}}) + \alpha_5 \cdot (h_5 - h_{\text{од5}}) \right) = \alpha_{\text{ок2}} \cdot (h_{\text{пнд5}} - h_{\text{пнд6}}); \\ \alpha_{\text{др5}} = \alpha_{\text{др4}} + \alpha_{\text{в}} + \alpha_5. \end{array} \right.$$

П6:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{с}} \cdot (\alpha_6 \cdot h_6 + (\alpha_{\text{др4}} + \alpha_{\text{в}} + \alpha_5) \cdot h_{\text{од5}} + \alpha_{\text{ок1}} \cdot h_{\text{см}}) = \alpha_{\text{ок2}} \cdot h_{\text{пнд6}}; \\ \alpha_{\text{ок2}} = \alpha_{\text{ок1}} + \alpha_6 + \alpha_{\text{др4}} + \alpha_{\text{в}} + \alpha_5. \end{array} \right.$$

Точка смешения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\text{др7}} \cdot h_{\text{др7}} + \alpha_{\text{ок}} \cdot h_{\text{пнд7}} = \alpha_{\text{ок1}} \cdot h_{\text{см}}; \\ \alpha_{\text{ок1}} = \alpha_{\text{ок}} + \alpha_{\text{др7}}. \end{array} \right.$$

П7:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{п}} \cdot (\alpha_7 \cdot (h_7 - h_{\text{др7}})) = \alpha_{\text{ок}} \cdot (h_{\text{пнд7}} - h_{\text{ок}}^*); \\ \alpha_{\text{др7}} = \alpha_7. \end{array} \right.$$

Материальный баланс в конденсаторе:

$$\alpha_{\text{к0}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_3 + \alpha_{\text{упл}} + \alpha_{\text{уг}},$$

где  $\alpha_{\text{к}} = 1 - \alpha_1 - \alpha_{\text{пп1}} - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{\text{с}} - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7$ .

Сгруппируем уравнения по принципу наименьшего количества для решения. Подставив в систему известные величины, получим:

Точка смешения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\text{пв0}} \cdot 984 + \alpha_{\text{пп2}} \cdot 1246 = \alpha_{\text{пв}} \cdot 985; \\ \alpha_{\text{пв}} = \alpha_{\text{пв0}} + \alpha_{\text{пп2}}. \end{array} \right.$$

П1:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,98 \cdot (\alpha_{\text{пп1}} \cdot (997 - 905) + \alpha_1 \cdot (2779 - 905)) = \alpha_{\text{пв0}} \cdot (984 - 880); \\ \alpha_{\text{др1}} = \alpha_1 + \alpha_{\text{пп1}}. \end{array} \right.$$

П2:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,98 \cdot (\alpha_{\text{др1}} \cdot (905 - 815) + \alpha_2 \cdot (2708 - 815)) = \alpha_{\text{пв0}} \cdot (880 - 778); \\ \alpha_{\text{др2}} = \alpha_{\text{др1}} + \alpha_2. \end{array} \right.$$

Д:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,99 \cdot (\alpha_{\text{др2}} \cdot 815 + 0,0014 \cdot 2780 + \alpha_3 \cdot 2620 + \alpha_{\text{с}} \cdot 692 + \alpha_{\text{ок2}} \cdot 703) = \\ = \alpha_{\text{пв0}} \cdot 768 + 0,003 \cdot 2778; \\ \alpha_{\text{пв0}} = \alpha_{\text{ок2}} + \alpha_{\text{с}} + \alpha_3 + 0,0014 + \alpha_{\text{др2}} - 0,003. \end{array} \right.$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		97

П4:

$$\begin{cases} 0,98 \cdot (0,0036 \cdot (693 - 590) + \alpha_4 \cdot (2558 - 590)) = \alpha_{ок2} \cdot (703 - 565); \\ \alpha_{др4} = 0,0036 + \alpha_4. \end{cases}$$

П5:

$$\begin{cases} 0,98 \cdot ((\alpha_{др4} + 0,0036) \cdot (590 - 453) + \alpha_5 \cdot (2862 - 453)) = \\ = \alpha_{ок2} \cdot (565 - 428); \\ \alpha_{др5} = \alpha_{др4} + 0,0036 + \alpha_5. \end{cases}$$

П6:

$$\begin{cases} 0,99 \cdot (\alpha_6 \cdot 2689 + (\alpha_{др4} + 0,0036 + \alpha_5) \cdot 453 + \alpha_{ок1} \cdot h_{см}) = \alpha_{ок2} \cdot 428; \\ \alpha_{ок2} = \alpha_{ок1} + \alpha_6 + \alpha_{др4} + 0,0036 + \alpha_5. \end{cases}$$

Точка смешения:

$$\begin{cases} \alpha_{др7} \cdot 299 + \alpha_{ок} \cdot 293 = \alpha_{ок1} \cdot h_{см}; \\ \alpha_{ок1} = \alpha_{ок} + \alpha_{др7}. \end{cases}$$

П7:

$$\begin{cases} 0,98 \cdot (\alpha_7 \cdot (2536 - 299)) = \alpha_{ок} \cdot (293 - 158); \\ \alpha_{др7} = \alpha_7. \end{cases}$$

Материальный баланс в конденсаторе

$$\alpha_{к0} = \alpha_{к} + 0,003 + 0,01 + 0,01,$$

где  $\alpha_{к} = 1 - \alpha_1 - \alpha_{пп1} - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_с - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7$ .

Результат расчета системы уравнений:

$$h_{см} = 293 \text{ кДж/кг.}$$

Доля пара, отбираемого из турбины, сепаратора и на перегрев ступени ПП:

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0,0556; \\ \alpha_{пп1} = 0,0502; \\ \alpha_2 = 0,0503; \\ \alpha_3 = 0,0331; \\ \alpha_с = 0,0715; \\ \alpha_4 = 0,0544; \\ \alpha_5 = 0,0409; \\ \alpha_6 = 0,0377; \\ \alpha_7 = 0,0363. \end{cases}$$

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		98

Относительный расход воды в характерных точках:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{пв} = 1,0716; \\ \alpha_{др1} = 0,1058; \\ \alpha_{др2} = 0,1561; \\ \alpha_{др4} = 0,0580; \\ \alpha_{др5} = 0,1025; \\ \alpha_{др7} = 0,0363; \\ \alpha_{к0} = 0,593; \\ \alpha_{к} = 0,570; \\ \alpha_{ок1} = 0,6293; \\ \alpha_{ок2} = 0,7695; \\ \alpha_{пв0} = 1,0286. \end{array} \right.$$

Определяем долю пара, идущего на перегрев второй ступени ПП:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{пп2} \cdot (h_0 - h'_{пп2}) \cdot \eta_{пп} = \alpha_{цнд} \cdot (h_{пп} - h_{пп}^*); \\ \alpha_{цнд} = 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{пп1} - \alpha_c. \end{array} \right.$$

Подставляя известные значения величин, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{пп2} \cdot (2903 - 1246) \cdot 0,98 = \alpha_{цнд} \cdot (2981 - 2879); \\ \alpha_{цнд} = 1 - 0,0556 - 0,0503 - 0,0331 - 0,0544 - 0,0502 - 0,0715. \end{array} \right.$$

$$\alpha_{пп2} = 0,043.$$

Расход пара из парогенерирующей установки:

$$\alpha_{пг} = \alpha_{ту} + \alpha_{ут} + \alpha_{упл} = 1,043 + 0,01 + 0,01 = 1,063.$$

Проведем проверку.

Проверка баланса по пару:

$$\begin{aligned} \alpha_{к} &= 1 - \alpha_1 - \alpha_{пп1} - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_c - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7 = \\ &= 1 - 0,0556 - 0,0502 - 0,0503 - 0,0331 - 0,0544 - 0,0715 - 0,0409 - \\ &\quad - 0,0377 - 0,0363 = 0,57. \end{aligned}$$

Проверка баланса по воде:

$$\begin{aligned} \alpha_{к} &= \alpha_{пв} - \alpha_{пп2} - \alpha_1 - \alpha_{пп1} - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_c - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7 - \\ &\quad - \alpha_{в} - \alpha_{п} - \alpha_{упл} - \alpha_{ут} = 1,0716 - 0,043 - 0,0556 - 0,0502 - \\ &\quad - 0,0503 - 0,0331 - 0,0544 - 0,0715 - 0,0409 - 0,0377 - 0,0363 - \\ &\quad - 0,0014 - 0,0036 - 0,01 - 0,01 = 0,57. \end{aligned}$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		99

### 3.4.4 Расходы пара и воды в характерных точках

$$G_{пв} = \alpha_{пв} \cdot G_0 = 1,0716 \cdot 1502,7 = 1610,3 \text{ кг/с};$$

$$G_{пп2} = \alpha_{пп2} \cdot G_0 = 0,043 \cdot 1502,7 = 64,6 \text{ кг/с};$$

$$G_{ту} = \alpha_{ту} \cdot G_0 = 1,043 \cdot 1502,7 = 1567,3 \text{ кг/с};$$

$$G_1 = \alpha_1 \cdot G_0 = 0,0556 \cdot 1502,7 = 83,6 \text{ кг/с};$$

$$G_{пп1} = \alpha_{пп1} \cdot G_0 = 0,0502 \cdot 1502,7 = 75,4 \text{ кг/с};$$

$$G_2 = \alpha_2 \cdot G_0 = 0,0503 \cdot 1502,7 = 75,6 \text{ кг/с};$$

$$G_3 = \alpha_3 \cdot G_0 = 0,0331 \cdot 1502,7 = 49,7 \text{ кг/с};$$

$$G_4 = \alpha_4 \cdot G_0 = 0,0544 \cdot 1502,7 = 81,7 \text{ кг/с};$$

$$G_c = \alpha_c \cdot G_0 = 0,0715 \cdot 1502,7 = 107,4 \text{ кг/с};$$

$$G_5 = \alpha_5 \cdot G_0 = 0,0409 \cdot 1502,7 = 61,5 \text{ кг/с};$$

$$G_6 = \alpha_6 \cdot G_0 = 0,0377 \cdot 1502,7 = 56,7 \text{ кг/с};$$

$$G_7 = \alpha_7 \cdot G_0 = 0,0363 \cdot 1502,7 = 54,5 \text{ кг/с};$$

$$G_{ут} = G_{дв} = \alpha_{ут} \cdot G_0 = 0,01 \cdot 1502,7 = 15,1 \text{ кг/с};$$

$$G_э = \alpha_э \cdot G_0 = 0,003 \cdot 1502,7 = 4,5 \text{ кг/с};$$

$$G_{упл} = \alpha_{упл} \cdot G_0 = 0,01 \cdot 1502,7 = 15,1 \text{ кг/с};$$

$$G_{п} = \alpha_{п} \cdot G_0 = 0,0014 \cdot 1502,7 = 2,1 \text{ кг/с};$$

$$G_{в} = \alpha_{в} \cdot G_0 = 0,0036 \cdot 1502,7 = 5,4 \text{ кг/с};$$

$$G_{пр} = \alpha_{пр} \cdot G_0 = 0,005 \cdot 1502,7 = 7,5 \text{ кг/с};$$

$$G_{пг} = \alpha_{пг} \cdot G_0 = 1,063 \cdot 1502,7 = 1597,4 \text{ кг/с}.$$

### 3.5 Определение показателей экономичности энергоблока (станции)

Определим тепловую нагрузку парогенерирующей установки:

$$\begin{aligned} Q_{пг} &= G_{пг} \cdot (h_0 - h_{пв}) + G_{пр} \cdot (h'_{пр} - h_{пв}) = \\ &= 1597,4 \cdot (2903 - 985) + 7,5 \cdot (1350 - 985) = 3066,5 \text{ МВт}. \end{aligned}$$

Определим полную тепловую нагрузку турбоустановки:

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		100

$$Q_{\text{ту}} = G_0 \cdot [(\alpha_{\text{ту}} + \alpha_{\text{упл}}) \cdot (h_0 - h_{\text{пв}}) + \alpha_{\text{дв}} \cdot (h'_k - h_{\text{пв}}) + \alpha_{\text{п}} \cdot (h''_{\text{п}} - h_{\text{пв}}) + \alpha_{\text{в}} \cdot (h_{\text{в}} - h_{\text{пв}})] = 1502,7 \cdot [(1,043 + 0,01) \cdot (2903 - 985) + 0,01 \cdot (138 - 985) + 0,0016 \cdot (2780 - 985) + 0,0036 \cdot (693 - 985)] = 3024,9 \text{ МВт.}$$

КПД турбоустановки по производству электроэнергии:

$$\eta_{\text{ту}}^{\text{э}} = \frac{N_{\text{э}}}{Q_{\text{ту}}} = \frac{1200}{3024,9} = 0,397.$$

Транспортный КПД:

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{ту}}}{Q_{\text{пг}}} = \frac{3024,9}{3066,5} = 0,986.$$

КПД блока по отпуску электроэнергии (нетто):

$\eta_c^{\text{э}} = \eta_{\text{ту}}^{\text{э}} \cdot \eta_{1\text{к}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot (1 - \kappa_{\text{сн}}) = 0,397 \cdot 0,965 \cdot 0,986 \cdot (1 - 0,05) = 0,358$ ,  
 где  $\eta_{1\text{к}} = \eta_{\text{ру}} \cdot \eta_{\text{тр1}} \cdot \eta_{\text{пг}} = 0,99 \cdot 0,995 \cdot 0,98 = 0,965$  – КПД первого контура;  $\eta_{\text{ру}} = 0,99$  – КПД реакторной установки;  $\eta_{\text{тр1}} = 0,995$  – КПД трубопроводов 1-го контура;  $\eta_{\text{пг}} = 0,98$  – КПД парогенератора;  $\kappa_{\text{сн}}$  – удельный расход энергии на собственные нужды. Для двухконтурных АЭС принимается равным 0,05 – 0,055. Примем  $\kappa_{\text{сн}} = 0,05$  [21, с.227].

Удельный расход выгоревшего ядерного горючего на отпуск электроэнергии [21, с.227]:

$$b_{\text{яг}}^* = \frac{0,0537}{\eta_c^{\text{э}}} = \frac{0,0537}{0,358} = 0,15 \frac{\text{г}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}.$$

Удельный расход ядерного горючего (природного урана) на АЭС:

$$b_{\text{яг}} = \frac{1000}{\eta_c^{\text{э}} \cdot 24 \cdot \bar{B}} \cdot \frac{x_{\text{н}} - x_0}{x_{\text{е}} - x_0} = \frac{1000}{0,358 \cdot 24 \cdot 55 \cdot 10^3} \cdot \frac{5,0 - 0,25}{0,71 - 0,25} = 0,022 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}},$$

где  $\bar{B} = 55 \cdot 10^3$  МВт · сут/т - средняя глубина выгорания топлива для АЭС с реактором ВВЭР-1200;  $x_{\text{н}}$ ,  $x_{\text{е}}$ ,  $x_0$  – содержание урана-235, соответственно, в свежем (начиная со второй загрузки), природном и отвальном уравнение обогатительного производства; принимают для АЭС с ВВЭР:  $x_{\text{н}} = 5,0$  %,  $x_{\text{е}} = 0,71$  %,  $x_0 = 0,25$  %.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		101

$$x_e = 0,71 \%, x_0 = 0,25 \% [21, \text{с.228}].$$

### 3.6 Выбор оборудования, оценка мощности основных механизмов собственных нужд

Выбор регенеративных подогревателей.

В первую очередь для каждого подогревателя определим площадь поверхности нагрева. Далее по известным характеристикам (расход воды, давление воды, давление пара, площадь поверхности нагрева) произведем выбор РППВ. Полученные результаты занесем в таблицу Г.2

ПВД2.

Тепловая нагрузка подогревателя:

$$Q_{n2} = G_{не} \cdot (h_{не\delta 2} - h_{не\delta 1}) = 1545,7 \cdot (984 - 880) = 160,7 \text{ МВт}.$$

Средний логарифмический температурный напор:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{м}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{м}}} = \frac{25,9 - 2,9}{\ln \frac{25,9}{2,9}} = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $\Delta t_{\delta} = t_s^{ПВД2} - t_{не\delta 1} = 231,4 - 205,5 = 25,9^\circ\text{C}$  – больший температурный напор;

$\Delta t_{м} = t_s^{ПВД2} - t_{не} = 231,4 - 228,5 = 2,9^\circ\text{C}$  – меньший температурный напор.

Необходимая площадь поверхности нагрева:

$$F_{не\delta 3} = \frac{Q_{n3}}{k \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{160,7 \cdot 10^6}{400 \cdot 10,5} = 3826 \text{ м}^2,$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, принимается 3...4 кВт/(м<sup>2</sup>·°C).

Выбор дренажного насоса для ПНД-7.

Общая массовая подача насоса:

$$G_B = 54,5 \text{ кг/с}.$$

Подача сливного насоса:

$$Q_{сн} = \frac{G_{op} \cdot 3600}{\rho_{op}} = \frac{54,5 \cdot 3600}{977} = 200,8 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
						102
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

где  $\rho_B = f(P_s^7) = 977 \text{ кг/м}^3$  – плотность конденсата, перекачиваемого сливным насосом.

Напор, развиваемый сливным насосом:

$$H_B = \frac{\Delta P}{\rho_B \cdot g} = \frac{0,096 \cdot 10^6}{977 \cdot g} = 10 \text{ м.}$$

Анализируя полученные параметры подберем насос, основываясь на соответствующие каталоги [26].

Таблица № 4 - Основные характеристики насоса

Наименование агрегата	Кол.	Подача	Напор	Частота вращения	КПД	Мощность
	шт.	м <sup>3</sup> /ч	м	об/мин	%	кВт
КсВ200-220	1	200	220	1500	73	164

Примем один рабочий насос и один резервный. Резерв 100%.

Выбор конденсатных насосов.

Конденсатные насосы выбирают с одним резервным насосом. По возможности число насосов должно быть минимальным.

Определим общую массовую подачу конденсатных насосов первой ступени:

$$G_{КЭН-1} = G_K + G_{ДВ} + G_{УПЛ} = 866,4 + 15,1 + 15,1 = 896,6 \text{ кг/с.}$$

Объемная подача составит:

$$V_{КЭН-1} = \frac{G_{КЭН-1}}{\rho_{КЭН-1}} = \frac{896,6}{995} \cdot 3600 = 3244 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

где  $\rho_{КЭН-1} = 995 \text{ кг/м}^3$  – плотность конденсата, перекачиваемого конденсатными насосами первой ступени.

Напор, развиваемый КЭН-1:

$$P_{КЭН-1} = 0,5 \text{ МПа};$$

$$H_{КЭН-1} = \frac{P_{КЭН-1}}{\rho_{КЭН-1} \cdot g} = \frac{0,5 \cdot 10^6}{995 \cdot 9,81} = 51,2 \text{ м.}$$

Анализируя полученные параметры подберем КЭН-1, основываясь на соответствующие каталоги.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		103

Таблица № 5 - Основные характеристики КЭН-1

Наименование агрегата	Кол.	Подача	Напор	Частота вращения	КПД	Мощность
	шт.	м <sup>3</sup> /ч	м	об/мин	%	кВт
КсВ1600-120	3	1600	90	1000	76	515

Примем два рабочих насоса и один резервный. Резерв 100%.

Общая массовая подача конденсатных насосов второй ступени:

$$G_{КЭН-2} = G_{КЭН-1} = 896,6 \text{ кг/с.}$$

Объемная подача составит:

$$V_{КЭН-2} = \frac{G_{КЭН-2}}{\rho_{КЭН-2}} = \frac{896,6}{995} \cdot 3600 = 3244 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

где  $\rho_{КЭН-2} = 995 \text{ кг/м}^3$  – плотность конденсата, перекачиваемого конденсатными насосами второй ступени.

Напор, развиваемый КЭН-2:

$$H_{КЭН-2} = \frac{P_{КЭН-2}}{\rho_{КЭН-2} \cdot g} = \frac{0,124 \cdot 10^6}{995 \cdot 9,81} = 13 \text{ м.}$$

Анализируя полученные параметры подберем КЭН-2, основываясь на соответствующие каталоги.

Таблица № 6 - Основные характеристики КЭН-2

Наименование агрегата	Кол.	Подача	Напор	Частота вращения	КПД	Мощность
	шт.	м <sup>3</sup> /ч	м	об/мин	%	кВт
КсВ1600-120	3	1600	90	1000	76	515

Примем два рабочих насоса и один резервный. Резерв 100%.

Общая массовая подача конденсатных насосов третьей ступени:

$$G_{КЭН-3} = 1156,3 \text{ кг/с.}$$

Объемная подача составит:

$$V_{КЭН-2} = \frac{G_{КЭН-2}}{\rho_{КЭН-2}} = \frac{1156,3}{953} \cdot 3600 = 4368 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

где  $\rho_{КЭН-3} = 953 \text{ кг/м}^3$  – плотность конденсата, перекачиваемого конденсатными насосами второй ступени.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		104

Напор, развиваемый КЭН-3:

$$H_{\text{КЭН-3}} = \frac{P_{\text{КЭН-3}}}{\rho_{\text{КЭН-3}} \cdot g} = \frac{0,901 \cdot 10^6}{953 \cdot 9,81} = 96 \text{ м.}$$

Анализируя полученные параметры подберем КЭН-3, основываясь на соответствующие каталоги.

Таблица № 7 - Основные характеристики КЭН-3

Наименование агрегата	Кол.	Подача	Напор	Частота вращения	КПД	Мощность
	шт.	м <sup>3</sup> /ч	м	об/мин	%	кВт
КсВ1600-90	3	1600	90	1000	76	515

КЭН-3 был выбран по параметрам близким к расчётам, но требуется дополнительное проектирование, чтобы он удовлетворял заданным значениям напора и подачи.

Примем два рабочих насоса и один резервный. Резерв 100%.

Выбор питательного насоса.

Расход питательной воды:

$$G_{\text{ПВ}} = \alpha_{\text{ПВ}} \cdot G_0 = 1,0286 \cdot 1502,7 = 1545,7 \text{ кг/с.}$$

Подача питательной воды:

$$Q_{\text{ПВ}} = \frac{3600 \cdot G_{\text{ПВ}}}{\rho_{\text{ПВ}}} = \frac{3600 \cdot 1545,7}{886} = 6280,4 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

где  $\rho_{\text{ПВ}} = f(P_d) = 886 \text{ кг/м}^3$  – плотность питательной воды.

Давление на входе в питательный насос:

$$P_d = 1,03 \text{ МПа.}$$

Давление на выходе из питательного насоса:

$$P_{\text{ПН}}^{\text{ВЫХ}} = 8,29 \text{ МПа.}$$

Напор питательного насоса:

$$H_{\text{ПВ}} = \frac{P_{\text{ПН}}^{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ПН}}^{\text{ВХ}}}{\rho_{\text{ПВ}} \cdot g} = \frac{(8,29 - 1,03) \cdot 10^6}{886 \cdot g} = 835,3 \text{ м.}$$

Таблица 8 - Основные характеристики ПЭН

Наименование агрегата	Кол.	Подача	Напор	Частота вращения	КПД	Мощность
	шт.	м <sup>3</sup> /ч	м	об/мин	%	МВт
ПЭА-1650-80	5	1650	910	2900	83	5,0

Примем четыре рабочих насоса и один резервный. Резерв 100%.

Деаэратор питательной воды.

Суммарная производительность деаэраторов выбирается по максимальному расходу питательной воды. На каждый блок устанавливается по возможности один деаэратор с одной или двумя колонками с рабочим давлением 0,59 – 1,29 МПа. Емкость баков деаэраторов должна быть на 15% больше запаса питательной воды, который составляет 3,5 минуты.

Расход питательной воды  $G_{ПВ} = 1545,7$  кг/с.

Емкость бака деаэратора:

$$V = 1,15 \cdot G_{ПВ} \cdot \nu \cdot \tau = 1,15 \cdot 1545,7 \cdot 0,001 \cdot 3,5 \cdot 60 = 373 \text{ м}^3,$$

где  $\nu = f(P_d) = 0,001 \text{ м}^3 / \text{кг}$ .

Выбираем деаэратор ДП-2800.

Таблица 9 – Характеристика деаэратор питательной воды

Типоразмер	Номинальная производительность, кг/с	Рабочее давление, МПа	Рабочая температура, °С	Пробное гидравл. давление, МПа	Геометрическая вместимость колонки, м <sup>3</sup>	Высота, м	Диаметр, мм	Масса колонки, кг
ДП-2800	777,7	0,74	167	1,05	49	7,16	3,4	18850

Таблица 10 – Характеристика деаэраторного бака

Типоразмер	Геометрическая вместимость, м <sup>3</sup>	Максимальная длина, мм	Масса, т.
БД-185-1	217,6	24270	40,8

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		106

Исходя из необходимых характеристик деаэратора, выбираем два деаэрационных бака БДП-185-1 на которых установлены по две деаэрационные колонки ДП-2800.

Конденсационная установка.

По прототипу турбины выбираем конденсатор из [26, стр.258]: Конденсатор 1200 КЦС-1, 2 штуки.

### 3.7 Обоснование числа петель реакторного контура

Для обоснования выбора числа петель первого и второго контуров и состава основного оборудования (ГЦН) приходится принимать во внимание большое число факторов. При проектировании определение числа петель является результатом решения задачи технико-экономической оптимизации, поскольку она тесно связана со стоимостью, эксплуатационной надёжностью и живучестью установки, с возможностями опытной отработки и промышленного изготовления оборудования, предшествующим техническим опытом. Важным дополнительным условием выступает при этом требование надёжного и безопасного охлаждения реактора при возможном выходе из строя отдельного оборудования.

В общем случае число петель и единиц оборудования не должно быть большим, так как это снижает структурную надёжность установки и увеличивает её капитальную стоимость. Характерная технико-экономическая тенденция развития, заключается в последовательном увеличении единичной мощности реакторов и основного оборудования блоков, сокращения числа единиц оборудования и количества петель первого и второго контуров. В данной работе примем 3 петли. Но не мало важным недостатком является то, что с уменьшением количества петель, возрастают размеры оборудования одной петли, что может негативно сказаться на компоновке реакторного отделения.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		107

### 3.7.1 Расчет числа потоков в ЦНД турбины

Число потоков, идущих в конденсатор, определяем по следующей формуле:

$$i = \frac{N_э}{\eta_M \cdot \eta_{ЭГ} \cdot N_i^{\text{пред}}},$$

где  $N_i^{\text{пред}}$  – предельная мощность однопоточной турбины,  $N_э$  – полная электрическая мощность турбины,  $\eta_M$  – механический КПД турбинной установки,  $\eta_{ЭГ}$  – КПД электрогенератора.

$$N_э = 1200 \text{ МВт};$$

$$\eta_M = 0,98;$$

$$\eta_{ЭГ} = 0,99.$$

Вычислим предельную мощность по формуле:

$$N_i^{\text{пред}} = \frac{m}{2\pi} k_{\text{разгр}} H_i \frac{[\sigma] c_2}{\rho_{\text{мат}} n^2 v_2},$$

где  $m$  – коэффициент, учитывающий выработку мощности потоками пара, направляемыми в регенеративные отборы, принимает значения  $1,1 \div 1,3$ .

Принимаем  $m = 1,2$ ;

$k_{\text{разгр}}$  – коэффициент разгрузки, зависящий от отношения площадей периферийного и корневого поперечных сечений лопатки, принимают значения  $2,3 \div 2,4$ . Принимаем  $k_{\text{разгр}} = 2,3$ ;

$H_i$  – действительный теплоперепад, срабатываемый в турбине:

$$H_i = 994 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

$[\sigma]$  – допустимое напряжение на растяжение для материала лопатки. В качестве материала для лопаток применяем сталь. Для стали:  $[\sigma] = 210 \text{ МПа}$ ;  
 $c_2$  – выходная скорость пара. Выходная скорость пара зависит от допустимой потери энергии  $\Delta h_{\text{вс}}$  с выходной скоростью. Потери с выходной скоростью принимаются равными одному из стандартных значений:

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		108

$$\Delta h_{\text{вс}} = 23 \div 35 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Примем значение потерь:  $\Delta h_{\text{вс}} = 30 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$

И определим выходную скорость пара:

$$\Delta h_{\text{вс}} = \frac{c^2}{2000};$$

$$c_2 = \sqrt{2000 \cdot \Delta h_{\text{вс}}} = \sqrt{2000 \cdot 30} = 244,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$\rho_{\text{мат}}$  – плотность материала лопатки. Плотность стали:  $\rho_{\text{мат}} = 7800 \text{ кг/м}^3$ ;

$n$  – частота вращения ротора;

$v_2$  – удельный объем пара на выходе из каналов рабочих лопаток последней ступени.  $v_2$  определим по  $h$ - $s$  диаграмме при известных энтальпии и давлении на выходе из турбины:

$$h_k = 2332 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$p_k = 5 \text{ кПа};$$

$$v_2 = 25,5 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Подставим полученные значения и определим предельную мощность однопоточной турбины:

$$N_i^{\text{пред}} = \frac{1,2}{2 \cdot 3,14} \cdot 2,3 \cdot 994000 \cdot \frac{210 \cdot 10^6 \cdot 244,9}{7800 \cdot 50^2 \cdot 25,5} = 452 \text{ МВт}.$$

Определим число потоков, идущих в конденсатор:

$$i = \frac{N_{\text{э}}}{\eta_{\text{м}} \eta_{\text{ЭГ}} N_i^{\text{пред}}} = \frac{1200}{0,99 \cdot 0,98 \cdot 452} = 2,7.$$

Округляем число потоков в большую сторону до ближайшего целого четного числа, так как число потоков не может быть дробным, если округлить в меньшую сторону – лопатки не выдержат нагрузки, а нечетное число потоков создает слишком большую нагрузку на опоры установки.

Получаем  $i = 4$ , то есть часть низкого давления будет состоять из двух двухпоточных цилиндров.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		109

#### 4 Расчет рассеивания выбросов АЭС

АЭС осуществляет выброс в атмосферу загрязненного радионуклидами воздуха через вентиляционную трубу высотой  $H_T$  с диаметром устья  $D_y$ .

Известны: мощность выброса по отдельным радионуклидам, температура выбрасываемого воздуха, температура атмосферного воздуха и т.п.

Необходимо определить для различных категорий состояний атмосферы:

- опасную скорость ветра;
- максимальные концентрации радионуклидов в приземном слое атмосферы при опасной и заданной скоростях ветра;

Графически представить распределение концентраций радионуклидов в приземном слое атмосферы в направлении оси факела при опасной и заданной скоростях ветра.

Таблица 11 – Исходные данные

Микрорельеф поверхности $Z_0$ , см	1
Мощность выброса $Q_j \cdot 10^{-7}$ (йод), Бк/сут	5
Мощность выброса $Q_a \cdot 10^{-7}$ (аэрозоли), Бк/сут	3
Мощность выброса $Q_r \cdot 10^{-12}$ (РБГ), Бк/сут	2
Радиус аэрозольных частиц $R_{ад}$ , мкм	2,5
Температура выбрасываемого воздуха $T_{ГВС}$ , °С	36
Температура атмосферного воздуха $T_0$ , °С	15
Скорость истечения выброса $w_0$ , М/с	10
Скорость ветра $U_f$ , М/с	4
Геометрическая высота трубы $H_T$ , м	160
Диаметр устья трубы $D_y$ , м	3
Состояние атмосферы	А,С,Е,Г

Работа выполняется с помощью программы «Расчет рассеивания радиоактивных веществ», основная математическая база которой строится на основе методике МАГАТЭ.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		110

1. По заданным исходным данным ветра при очень неустойчивом состоянии атмосферы (А) определяется расстояние по оси факела, на котором достигается максимальная концентрация радионуклидов и их максимальная концентрация.

В первом варианте расчета влияние осадков не учитывается, поэтому все расчеты производятся при отсутствии атмосферных осадков.

Таблица 12 – Результаты определения опасной скорости ветра

Составляющая выброса	Йод	Аэрозоли	РБГ
Опасная скорость ветра	1 м/с	0,5 м/с	1 м/с

Вывод: опасные скорости ветра для йода и для РБГ совпадают, когда для аэрозолей опасная скорость ветра меньше.

Дальнейший расчет представлен в приложении Д.

## 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Линейный график представляется в виде таблицы 13.

Таблица 13 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания на ВКР	3	30.07.2019	1.08.2019	руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	5	3.08.2019	7.08.2019	руководитель
3	Выбор методик решения поставленной задачи	7	12.08.2019	18.08.2019	студент
4	Сбор и изучение научно-технической литературы	14	19.08.2019	2.09.2019	студент
5	Расчёт энергоблока АЭС электрической мощность 1200 МВт	97	3.09.2019	8.12.2019	студент
6	Анализ и обработка полученных результатов	10	9.12.2019	18.12.2019	студент
7	Проверка ВКР, исправление ошибок	9/4	19.12.19	27.12.19	руководитель/ студент

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 2 с разбивкой по месяцам и декадам

(10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 14 – Календарный план-график проведения НИР по теме: «Расчёт энергоблока АЭС электрической мощностью 1200 МВт»

Календарный план-график выполнения работ по теме																					
№ работы	Наименование работы	Исполнители	Дни	Продолжительность выполнения работ, дни																	
				Июль			Авг			Сен			Окт			Ноя			Дек		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Разработка технического задания на ВКР	Р	3																		
2	Составление и утверждение технического задания	Р	5																		
3	Выбор методик решения поставленной задачи	С	7																		
4	Сбор и изучение научнотехнической литературы	С	14																		
5	Расчёт стационарного отравления ксенон-135	С	97																		
6	Анализ и обработка полученных результатов	С	10																		
7	Проверка ВКР, исправление ошибок	Р/С	9/6																		

### 5.1 Бюджет научно-исследовательской работы (НИР)

При планировании бюджета НИР должно быть обеспечено полное и

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		113

достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

В процессе формирования бюджета НИР используется следующая группировка затрат по статьям: материальные затраты НИР; затраты на специальное оборудование для научных работ; основная заработная плата исполнителей темы; дополнительная заработная плата исполнителей темы; отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления); затраты научные и производственные командировки; контрагентные расходы; накладные расходы.

## 5.2 Расчет материальных затрат НИР

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх } i},$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;  $N_{\text{расх } i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);  $C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);  $k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 15.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		114

Основные работы для ВКР проводились за персональным компьютером (ноутбуком) в комнате жилого дома. Время, проведенное за работой у компьютера, примем равным 700 часам. Мощность ноутбука: 0,19 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 2,45 \cdot 0,19 \cdot 700 = 326 \text{ руб.}$$

где  $C_{\text{эл}}$  – тариф на промышленную электроэнергию (2,45 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

$F_{\text{об}}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 326 рублей.

Таблица 15 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
1. Бумага	упак.	1	310	310
2. Печать на листе А4	шт.	142	2	284
3. Шариковая ручка	шт.	1	20	20
4. Доступ в интернет	месяц	5	600	3000
5. Электроэнергия	кВт·ч	700	2,45	326
Итого				3940

### 5.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИР, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		115

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}}}{\Gamma_{\text{д}}},$$

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

$\Gamma_{\text{д}}$  – количество рабочих дней в месяце.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{\text{тс}}$ );

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15- 20 % от  $Z_{\text{тс}}$ );

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 г. Томск.

Пример расчета заработной платы для руководителя:

$$\begin{aligned} Z_{\text{м}} &= Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 28992 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = \\ &= 56534,4 \text{ руб.}; \end{aligned}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}}}{\Gamma_{\text{д}}} = \frac{56534,4}{21} = 2692,1 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{осн}} = 2692,1 \cdot 17 = 45765,7 \text{ руб.}$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		116

Таблица 16 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З <sub>тс</sub> , руб	k <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб	T <sub>р</sub> , дни	З <sub>осн</sub> , руб
Руководитель	28992	1,3	42831,75	2039,6	17	45765,7
Студент	1988	1,3	2584,4	89,1	131	11674,4
Итого						57440,1

#### 5.4 Дополнительная заработная плата

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таблица 17 – Расчет дополнительной заработной платы

Исполнители	Основная ЗП, руб	Дополнительная ЗП, руб
Руководитель (доцент)	45765,7	5491,8

#### 5.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды являются обязательными по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда

(ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Основная ЗП, руб	Внебюджетные фонды, руб
Руководитель	45765,7	13729,7
Студент	11674,4	3502,3
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	-
Итого		17232

## 5.6 Накладные расходы

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = (З_{осн} + З_{доп}) \cdot k_{нр},$$

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		118

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

$$Z_{\text{накл}} = (45765,7 + 5491,8) \cdot 0,8 = 41006 \text{ руб.}$$

### 5.7 Формирование бюджета затрат НИР

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательскую работу по каждому варианту исполнения приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет бюджета затрат НИР

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	3940
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	57440,1
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	5491,8
4. Отчисления во внебюджетные фонды	17232
5. Накладные расходы	41006
Бюджет затрат НТИ	125109,9

## 6 Социальная ответственность

Безопасность человека на производстве является сложной многоуровневой задачей, одним из аспектов которой является социальная ответственность. Практика решения вопросов охраны труда на производстве показывает, что инженерно-технические решения этих вопросов, не могут обеспечить полностью качественную и эффективную защиту работников. Необходимо учитывать человеческий фактор, в том числе, повышать социальную и моральную ответственность работодателей за создаваемые условия труда.

Задачами социальной ответственности являются:

- снижение неблагоприятных воздействий производственных факторов на работника, т.е. установление оптимальных соотношений между факторами производственной среды;
- установление определенных норм допустимых значений каждого из неблагоприятных факторов;
- обеспечение безопасности выполнения работ как для исполнителя, так и для окружающих;
- разработка конкретных мероприятий по оздоровлению условия труда.

Большую часть времени активной жизнедеятельности человека занимает целенаправленная профессиональная работа, осуществляемая в конкретной производственной среде, которая при несоблюдении принятых нормативных требований может неблагоприятно повлиять на его работоспособность и здоровье.

Вопросы, связанные с условиями труда на производстве, характеризуются не только трудовыми процессами, но и окружающей санитарно-гигиенической обстановкой.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		120

## 6.1 Анализ рабочего места оператора турбинного цех

В разделе «Социальная ответственность» дипломной работы, рассмотрим одну из форм труда - форму интеллектуального (умственного) труда. Этот труд представлен профессиями, относящимися к сфере материального производства, например, конструкторы, инженеры, техники, диспетчеры, операторы и др.

Например, труд оператора машинного зала на АЭС связан с переработкой большого объема информации за короткое время и повышенной нервно-эмоциональной напряженностью, обусловленной ответственностью. Особенно тяжелыми и напряженными являются операции пуска и остановки оборудования. Работа на АЭС осуществляется круглосуточно, посменно, что существенно усугубляет напряженность труда.

Управление технологическими процессами осуществляют в основном операторы с центрального и блочных щитов управления, со щита управления машинного зала.

Далее представлен анализ рабочего места оператора машзала на предмет возникновения вредных и опасных производственных факторов.

К вредным производственным факторам относятся: микроклимат; монотонность труда; наличие электромагнитных полей; недостаточная освещенность рабочей зоны; шум.

К опасным производственным факторам, следует отнести: электробезопасность; раскаленные тела; пожаровзрывобезопасность.

Уровни воздействия на работающих вредных производственных факторов нормированы предельно-допустимыми уровнями, значение которых указаны в соответствующих стандартах системы стандартов безопасности труда и санитарно-гигиенических правилах.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		121

### 6.1.1 Микроклимат

Источник возникновения фактора – энергозатраты организма 151 – 200 ккал/ч, связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения, при работе в турбинном цеху.

Физическая природа – изменение температуры воздуха и теплового излучения.

Выполняемые работы оператором по энергозатратам относятся к категории Ia с наиболее низкими энергозатратами [33]. Однако работа оператора ЭВМ характеризуется большим нервно - эмоциональным напряжением, в деле снижения которого не последнюю роль играют санитарно-гигиенические условия производственного помещения.

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих от источников излучения, нагретых до белого и красного свечения, не должны превышать 140 Вт/м<sup>2</sup>. При этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела [33].

Температура воздуха на рабочих местах не должна превышать 22 °С при категории работ Ia, при наличии источника теплового излучения.

Неблагоприятные микроклиматические условия приводят к ухудшению самочувствия работника, ослаблению внимания, быстрой утомляемости, и при продолжительном воздействии могут вызвать различные заболевания, регламентируют нормы производственного микроклимата [33]. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны оператора представлены в таблице Е.1, нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры показаны в таблице Е.2.

Для обеспечения комфортных условий используются как организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		122

средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, отопительная система).

Расчёт требуемого воздухообмена в помещении представлен в приложении Ж.

### **6.1.2 Монотонность труда**

Источник возникновения фактора – оператор пульта управления реактора выполняет одну и ту же работу – наблюдает за показаниями приборов и в случае необходимости производит необходимые действия с выключателями на панели.

Природа состояния монотонности - колебания выполнения легкого труда, отрицательно влияет на работоспособность человека и переживается, как неприятное чувство. В таблице Е.3 указана оценка труда оператора, в соответствии с нормами [35].

### **6.1.3 Освещённость**

Помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Эксплуатация ПЭВМ в помещениях без естественного освещения допускается только при соответствующем обосновании и наличии положительного санитарно-эпидемиологического заключения, выданного в установленном порядке.

Естественное и искусственное освещение должно соответствовать требованиям действующей нормативной документации. Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, преимущественно должны быть ориентированы на север и северо-восток.

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		123

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов).

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк [34]. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Следует ограничивать прямую блескость от источников освещения, при этом яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м<sup>2</sup>.

Следует ограничивать отраженную блескость на рабочих поверхностях (экран, стол, клавиатура и др.) за счет правильного выбора типов светильников и расположения рабочих мест по отношению к источникам естественного и искусственного освещения, при этом яркость бликов на экране ПЭВМ не должна превышать 40 кд/м<sup>2</sup> и яркость потолка не должна превышать 200 кд/м<sup>2</sup>.

Показатель ослепленности для источников общего искусственного освещения в производственных помещениях должен быть не более 20. Показатель дискомфорта в административно-общественных помещениях - не более 40.

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90 градусов с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м<sup>2</sup>, защитный угол светильников должен быть не менее 40 градусов.

Светильники местного освещения должны иметь не просвечиваю-

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		124

щий отражатель с защитным углом не менее 40 градусов.

Для освещения помещений с ПЭВМ следует применять светильники с зеркальными параболическими решетками, укомплектованными электронными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА). Допускается использование многоламповых светильников с электромагнитными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА), состоящими из равного числа опережающих и отстающих ветвей.

Применение светильников без рассеивателей и экранирующих решеток не допускается.

### **6.1.4 Электромагнитное излучение**

Источники возникновения: ЭВМ, радиосвязь между оператором и обходчиками, организация беспроводных компьютерных сетей, инфракрасное излучение приборов.

Природа фактора – колебания электрического и магнитного полей, которые распространяются в вакууме со скоростью света.

Защита от ЭМИ: применение экранов с против-ЭДС и защит, максимально задерживающих излучение. Максимальное сокращение времени пребывания и перерывы в работе с возможностью выхода из помещения с высоким ЭМИ.

## **6.2 Опасные факторы**

### **6.2.1 Электробезопасность помещения**

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока, электрической дуги и проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		125

Согласно [38], в отношении опасности поражения людей электрическим током БЩУ относится к классу 1 – помещения без повышенной опасности (сухие, безпыльные, с нормальной температурой воздуха, с изолирующими полами). Безопасные номинальные значения: напряжение – менее 12 В; ток – менее 0,1 А; заземление менее 4 Ом.

По [39] напряжения прикосновения и токи при нормальном и аварийном режимах электроустановки с частотой тока 50 Гц и напряжением до 1000 В, не должны превышать значений, указанных в таблице Е.4, Е.5.

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям необходимо применять следующие СКЗ [40]: защитные оболочки; защитные ограждения (временные или стационарные); изоляцию токоведущих частей (рабочую, дополнительную, усиленную, двойную); предупредительную сигнализацию, блокировку, знаки безопасности.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

## 6.2.2 Температура поверхностей оборудования

Может привести к травмам кожных покровов или возникновению пожара. Источники: выделение тепловой энергии в процессе эксплуатации реактора, нагревание рабочих частей и оборудования высокой мощности и частоты работы.

Источниками пожаров являются взрыв газа, короткое замыкание электрических кабелей, попадание масла на горячие участки оборудования, ошибки персонала при обращении с огнем в процессе ремонтных работ, проверок систем [44]. Вычислительные центры должны располагаться в зданиях не ниже II степени огнестойкости, залы ЭВМ — не ниже первого этажа (допускается III степень огнестойкости).

Природа пожара - неконтролируемое горение вне специального очага, наносящее материальный ущерб.

					<b>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		126

Для естественно не продуваемых помещений, оборудование, имеющее температуру внешней поверхности более 75 °С, необходимо изолировать. Температура поверхности тепловой изоляции не должна превышать 40 °С [41].

Для РУ ВВЭР-1200 предусмотрена тепловая изоляция трубопроводов и бетонная защита корпуса реактора.

Для предотвращения пожара предусматриваются следующие меры [42]: использование при проектировании РУ главным образом негорючих или огнестойких материалов; проектирование и сооружение систем таким образом, чтобы их работа или выход из строя не приводили к пожару; исключение из зоны, где находятся важные для безопасности системы, горючих материалов или использование и хранение их под строгим контролем; проведение под строгим контролем всех работ, способных вызвать пожар (сварочные работы и др.).

Для тушения электрооборудования предусмотрены порошковые и углекислотные огнетушители.

План эвакуации помещения БПУ представлен в приложение Ж.

### **6.3 Охрана окружающей среды**

#### **6.3.1 Анализ воздействия на атмосферу**

Для очистки отходящих газов АЭС с реактором ВВЭР используется адсорбционный метод очистки, в частности способ динамической адсорбции радионуклидов криптона и ксенона в колонне, работающей в режиме непрерывного потока [43]. Она обеспечивает очистку в 102 - 104 раз, что позволяет поддерживать активность газовых выбросов АЭС значительно ниже норм, установленных санитарными правилами. Для поддержания норм качества теплоносителя и очистки его от различных примесей часть теплоносителя выводится из контура и направляется в системы очистки. В

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		127

состав таких систем входят фильтры, дегазаторы, выпарные установки, деаэратеры. Дегазированный теплоноситель возвращают в первый контур, а радиоактивные газы и аэрозоли направляют в специальные емкости выдержки или системы очистки. Кроме того, газообразные отходы возникают в результате дегазации разного рода протечек теплоносителя, при водообмене в реакторе и при отборе проб воды в бассейнах выдержки. Газообразные и аэрозольные отходы из монтажных пространств, боксов парогенераторов и насосов, защитных кожухов оборудования, емкостей с жидкими отходами выводят с помощью вентиляционных систем. Эти отходы перед выбросом в вентиляционную трубу очищаются на аэрозольных и йодных фильтрах.



Рисунок 12 - Схема обработки и удаления газообразных продуктов на АЭС с реактором типа ВВЭР или РБМК:

Г - фильтр грубой очистки; А (И) - аэрозольный (йодный) фильтр;  
РХС - радиохроматографическая система очистки газов

Отводимые от технологического оборудования газы состоят из азота с примесью водяного пара, водорода, газообразных продуктов деления. Объем этих газов равен 4-70 м<sup>3</sup>/ч для реакторов типа ВВЭР, в которых пер-

вый контур замкнут и герметичен. Время пребывания в нем радиоактивных веществ намного больше, чем в разомкнутом первом контуре кипящего реактора типа РБМК, т.к. расход воды из первого контура реактора типа ВВЭР в систему очистки с учетом протечек мал: 20 - 50 т/ч.

## **6.4 Правовое обеспечение безопасности жизнедеятельности на производстве**

### **6.4.1 Основные организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Эффективный и безопасный труд возможен только в том случае, если производственные условия на рабочем месте отвечают всем требованиям международных стандартов в области охраны труда.

Основная задача по созданию здоровых и безопасных условий труда и защите окружающей природной среды возложена на администрацию предприятия и инженерные кадры, которые обязаны выявлять и предупреждать, ограничивать или устранять опасные и вредные факторы производства, решать вопросы гуманизации техники, технологии и организации труда, нормализации санитарно-гигиенических параметров производственной среды, эргономичности помещений и рабочих мест, организации санитарно-бытового обслуживания работающих.

На пункте оператора турбинного отделения блочный пункт управления (БПУ) размещается автоматизированное рабочее место сменного инженера управления турбинным отделением (СИУТ), включающее в себя две двухдисплейные рабочие станции, предназначенные для контроля и управления подсистемами турбинного отделения.

Основным рабочим положением оператора является положение сидя. Рабочее место для выполнения работ в положении сидя организуется

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		129

в соответствии с [45]. В этом пространстве оператор проводит большую часть своего времени.

Из ГОСТа следует, что конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям. Также стоит принимать во внимание характер работы.

Так, при организации рабочего места оператора должны соблюдаться следующие условия:

- соблюдение общих средних антропометрических показателей женщин и мужчин;
- требуемое для работы оборудование должно быть оптимально размещено;
- рабочее пространство должно быть достаточным и позволять производить необходимые движения в ходе работы;
- для выполнения поставленных задач необходимо наличие естественного и искусственного освещения;
- рабочее пространство должно быть достаточно вентилируемым.

Эргономичность – главное требование при проектировании рабочего места оператора турбинным отделением. К требованиям эргономичного рабочего пространства можно отнести следующее: размеры рабочего пространства; высота рабочей поверхности стола; положение кресла и размеры пространства для ног; возможность регулирования рабочего места и положений кресла; расстояние и углы обзора средств отображения информации.

#### **6.4.2 Социальное страхование работников**

Основными принципами обязательного социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний являются [46]:

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		130

- гарантированность права застрахованных на обеспечение по страхованию;

- экономическая заинтересованность субъектов страхования в улучшении условий и повышении безопасности труда, снижении производственного травматизма и профессиональной заболеваемости;

- обязательность регистрации в качестве страхователей всех лиц, нанимающих (привлекающих к труду) работников, подлежащих обязательному социальному страхованию от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

- обязательность уплаты страхователями страховых взносов.

Обеспечение по страхованию осуществляется:

- в виде пособия по временной нетрудоспособности, назначаемого в связи со страховым случаем и выплачиваемого за счет средств на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

В виде страховых выплат:

- единовременной страховой выплаты застрахованному либо лицам, имеющим право на получение такой выплаты в случае его смерти;

- ежемесячных страховых выплат застрахованному либо лицам, имеющим право на получение таких выплат в случае его смерти;

В виде оплаты дополнительных расходов, связанных с медицинской, социальной и профессиональной реабилитацией застрахованного при наличии прямых последствий страхового случая, на:

- медицинскую помощь (первичную медико-санитарную помощь, специализированную, в том числе высокотехнологичную, медицинскую помощь) застрахованному, осуществляемую на территории Российской Федерации непосредственно после произошедшего тяжелого несчастного случая на производстве до восстановления трудоспособности или установления стойкой утраты профессиональной трудоспособности;

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		131

- приобретение лекарственных препаратов для медицинского применения и медицинских изделий;

- санаторно-курортное лечение в медицинских организациях (санаторно-курортных организациях), включая оплату медицинской помощи, осуществляемой в профилактических, лечебных и реабилитационных целях на основе использования природных лечебных ресурсов, в том числе в условиях пребывания в лечебно-оздоровительных местностях и на курортах, а также проживание и питание застрахованного, проживание и питание сопровождающего его лица в случае, если сопровождение обусловлено медицинскими показаниями, оплату отпуска застрахованного (сверх ежегодно оплачиваемого отпуска, установленного законодательством Российской Федерации) на весь период санаторно-курортного лечения и проезда к месту санаторно-курортного лечения и обратно;

- обеспечение транспортными средствами при наличии соответствующих медицинских показаний и отсутствии противопоказаний к вождению, их текущий и капитальный ремонт и оплату расходов на горюче-смазочные материалы.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		132

## 7 Система автоматического регулирования температуры свежего пара после РОУ

Проектируемая в данной главе система автоматического регулирования предназначена для подачи пара на уплотнения турбины, к эжекторам и парозежекторным машинам.

### 7.1 Краткое описание объекта регулирования

Редукционно-охладительные установки (РОУ) предназначены для, снижения давления и температуры пара (обычно острого, отводимого из основного паропровода). Снижение давления осуществляется с помощью дроссельного регулирующего клапана, а температуры — впрыском охлаждающей воды. Давление и температура редуцированного пара определяются назначением и требованиями потребителя пара.

На АЭС РОУ применяются для подачи пара на уплотнения турбины, к эжекторам и парозежекторным машинам [49].

Точность поддержания давления и температуры редуцированного пара диктуется потребителем. Обычно точность поддержания давления пара составляет  $\pm 2\%$ , температуры  $-1,5\%$ .

Схема подключения РОУ изображена на рисунке И.1.

Свежий пар поступает к дроссельному клапану 2 через входную задвижку 1, где снижается давление. Охлаждающая вода поступает через водяную задвижку 3 и регулирующий клапан 5 на форсунку 7.

Дроссельное устройство рассчитывается на пропуск такого количества воды, которое необходимо для охлаждения максимально возможного расхода пара. Для предотвращения опасного повышения давления, дросселированного пара на выходном паропроводе, устанавливается предохранительное устройство 8. На охладителе пара (ОП) соосно с его корпусом

					<b>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		133

обычно устанавливается защитная труба, предназначенная для уменьшения вредного воздействия воды на стенку охладителя пара.

Как объект регулирования РОУ имеет две регулируемые величины: давление и температура пара после РОУ.

Возмущающими воздействиями на температуру пара являются изменение потребления пара, расход и давление свежего пара.

Регулирующим воздействием на температуру — изменение расхода охлаждающей воды. Как объект регулирования давления РОУ обладает самовыравниванием, и ее динамику можно описать уравнением инерционного звена первого порядка. Как объект регулирования температуры РОУ можно считать безынерционным объектом, однако, так как температура измеряется инерционным датчиком, то инерционность РОУ определяется инерционностью датчика.

Температура редуцированного пара регулируется регулятором температуры  $P_t$ , получающим импульс от измерительного преобразователя температуры  $ИП_t$ , и воздействующим на клапан 5. Для повышения точности измерения температуры,  $ИП_t$  должен устанавливаться на расстоянии 8-10 м после впрыска, чтобы влага успела полностью испариться. Иногда для сохранения постоянного перепада давления на клапане 6 в широком диапазоне изменения расходов впрыска в качестве клапана 6 применяется трехходовой клапан постоянного расхода. Такой клапан обеспечивает изменение подачи воды в пароохладитель путем сброса ее в сливную линию 7 при неизменном расходе воды через дроссель 5.

## 7.2 Разработка структуры автоматической системы регулирования температуры пара

Структурная схема - это графическое изображение структуры управления, которая представляет собой совокупность частей автоматической си-

					<b>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		134

стемы и пути передачи воздействий между ними. Использование одноконтурной АСР достаточно для решения данной задачи. Одноконтурная АСР наиболее проста в монтаже и эксплуатации и наиболее распространена [48]. Структурная схема АСР системы регулирования показана на рисунке И2.

В АСР управление вырабатывается при сравнение истинного значения с заданным.

Принцип работы одноконтурной АСР заключается в том, что регулятор производит постоянное сравнение текущего значения регулируемой величины  $Y$  с заданным значением  $X$ . Если  $Y$  равно  $X$ , то регулятор не изменяет управляющее воздействие, то АСР работает в установившемся режиме, в противном случае управляющее воздействие на объект изменяется в соответствии с величиной ошибки. Чем больше ошибка регулирования, тем больше изменение управляющего воздействия.

### **7.3 Выбор технических средств для реализации систем контроля и автоматизации ТООУ**

#### **7.3.1 Первичный преобразователь**

При измерении температуры на теплоэнергетических объектах в качестве первичных преобразователей используют ТЭП. Преобразователь термоэлектрический ТХА Метран-231-01 предназначен для преобразования температуры в унифицированный токовый выходной сигнал.

Требуемые пределы измерения температуры 0-600 °С. Для определения температуры этим характеристикам соответствует: преобразователь термоэлектрический, НСХ К (ХА), длина монтажной части 160 мм, класс допуска 2, количество чувствительных элементов 1. ПГ «Метран», г. Челябинск. Тип: ТХА Метран-231-01-160-2-1.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		135

### 7.3.2 Регулирующие устройства

Контроллер ОВЕН предназначен для общепромышленного применения в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в различных отраслях промышленности – энергетической, металлургической, пищевой, химической, машиностроительной и т. д.

Программное обеспечение контроллера позволяет пользователю:

- измерение температуры или других физических величин (давления, влажности, расхода, уровня и т.п.) в одной точке с помощью стандартного датчика, подключаемого к универсальному входу прибора;
- регулирование измеряемой величины по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону;
- отображение текущего измерения на встроенном светодиодном цифровом индикаторе;
- автоматическое определение коэффициентов ПИД-регулятора (автонастройка);
- формирование управляющего воздействия на Выходе 1 с помощью выходного аналогового сигнала;
- формирование на Выходе 2 дополнительного сигнала управления по двухпозиционному закону или сигнала «Авария».

Измеритель ПИД-регулятор микропроцессорный одноканальный ТРМ10 совместно с первичным преобразователем (датчиком) предназначен для измерения и регулирования температуры и других физических параметров, значение которых внешним датчиком может быть преобразовано в сигналы постоянного тока или напряжения. Прибор может использоваться для измерения и регулирования технологических параметров в различных отраслях промышленности, в том числе подконтрольных Ростехнадзору, а также коммунального и сельского хозяйства.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		136

### 7.3.3 Блок управления

Функциями блока управления являются: ручное или дистанционное переключение цепей управления на два положения; световая сигнализация положения цепей; управление исполнительным механизмом (ИМ).

Выберем блок ручного управления БРУ-22. ОАО «ЗЭиМ», г. Чебоксары.

### 7.3.4 Исполнительный механизм

Исполнительные механизмы являются приводной частью регулирующего органа (клапан, задвижка, заслонка и т. п.) и предназначены для его перемещения. ИМ в зависимости от используемой энергии подразделяются на следующие виды: пневматические; гидравлические; электрические.

Наибольшее распространение при автоматизации объектов теплоэнергетики получили электрические ИМ. В общем случае электрический ИМ включает электропривод (электродвигатель и редуктор), блок сигнализации положения и штурвал. Выбор необходимого типа ИМ в первую очередь определяется типом запорной арматуры.

Для нашей схемы подходит клапан регулирующей тип ИМ – МЭП, с значением номинального усилия на штоке 25000 Н.

### 7.3.5 Пускатель

Функцией пускателя приходится бесконтактное управление электрическими исполнительными механизмами и приводами, пуск, реверс любых синхронных и асинхронных двигателей мощностью до 1,1 кВт.

Для АЭС выбираем исполнение ПБР-2МА. ОАО «ЗЭиМ», г. Чебоксары.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		137

## 7.4 Разработка функциональных схем систем контроля и автоматизации ТООУ

Функциональная схема систем автоматизации технологических процессов является основным техническим документом, определяющим структуру и характер систем автоматизации технологических процессов, а также оснащение их приборами и средствами автоматизации (в том числе и средствами вычислительной техники).

Контролируемый технологический параметр: температура свежего пара после РОУ,  $t = 345\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В соответствии с требованиями технологического процесса к объему и уровню автоматизации, с учетом выбранной структуры управления и технических средств, в дипломной работе разработана функциональная схема АСР температуры свежего пара после РОУ и представленная на листе ФЮРА.421018.000. С2 [47].

## 7.5 Выполнение заказной спецификации на технические средства контроля и автоматизации ТООУ

Заказная спецификация предназначена для закупки приборов и средств автоматизации, необходимых для реализации решений, принятых при разработке технического проекта и отраженных на функциональной схеме автоматизации. Представляет собой техническую документацию, в которой отражены необходимые сведения о приборах и средствах автоматизации объекта. Помимо приборов и средств автоматизации, которые изображают на функциональной схеме, также в спецификацию включают вспомогательные элементы, не показанные на схеме, но являющиеся их неотъемлемой частью. Спецификация выполняется в соответствии со стандартом ГОСТ 21.110-95.

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		138

## Заклучение

В данной выпускной квалификационной работе произведен проект энергоблока АЭС электрической мощности 1200 МВт.

Произведен расчет ядерного реактора, целью которого является освоение методики расчета реактора на тепловых нейтронах. Основными расчетами являются: теплогидравлический расчет и расчет на прочность отдельных элементов.

Следует отметить основные выводы:

– спроектирован реактор тепловой мощностью 3200 МВт, расход теплоносителя – 17391,3 кг/с; габаритные размеры: высота активной зоны – 3730 мм, эквивалентный диаметр активной зоны – 3200 мм;

– итогом теплогидравлического расчета стало подтверждение обеспечения теплотехнической надежности: температуры оболочки, наружной и внутренней поверхности сердечника соответствуют допустимым;

– выполнен механический расчет: толщина стенки корпуса 211 мм и эллиптического днища 115 мм; проведены расчеты на прочность сердечника и оболочки твэла.

Важным аспектом проекта является расчет ядерного реактора на 2 и 3 петли. В результате технико-экономического расчета принято решение о проектировании ядерного реактора на 3 петли.

В результате проведенных расчетов спроектирован обогреваемый водой под давлением горизонтальный корпусный парогенератор насыщенного пара с естественной циркуляцией рабочей среды и с U-образными трубками поверхности теплообмена со следующими параметрами:

- суммарная тепловая мощность ПГ  $Q_{ПГ} = 1011 \text{ МВт}$  ;
- средняя длина теплообменной трубки в трубном пучке  $l = 10,5 \text{ м}$  ;
- размер теплообменной трубки 14x1,5 мм;
- расход греющей среды  $G = 5797,1 \text{ кг/с}$  ;

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		139

- расход рабочего тела  $D = 552,9 \text{ кг/с}$ .

Также в процессе расчета проекта спроектирована на заданные параметры тепловая схема паротурбинной установки энергоблока АЭС с реакторами типа ВВЭР электрической мощностью 12000 МВт. Принципиальная тепловая схема рассчитана на конденсационный режим работы. Определены показатели тепловой экономичности  $Q_{TV}^{\text{э}} = 3024,9 \text{ МВт}$ ;  $\eta_C^{\text{э}} = 0,358$   $\eta_{TV}^{\text{э}} = 0,397$ . Номинальный расход пара на турбину составляет  $G_0 = 1502,7 \text{ кг/с}$ .

Произведен выбор основного оборудования, ориентируясь на прототип по рассчитанным параметрам основного конденсата и питательной воды. В состав ПТУ входит двухпоточный ЦВД и два двухпоточных ЦНД, а также 6 регенеративных подогревателей, все подогреватели, кроме второго, поверхностного типа.

Так же спроектирована компоновка данной АЭС. Компоновка в основном ориентирована на прототип – энергоблок ВВЭР-1200. Главный корпус состоит из реакторного отделения и машинного зала. В реакторном отделении располагаются реактор, парогенераторы, три ГЦН, и прочее вспомогательное оборудование реактора. В защитной оболочке установлен кран для обслуживания оборудования и перегрузки топлива.

С помощью программы МАГАТЭ определен ряд параметров для выбросов АЭС в атмосферу загрязненного радионуклидами воздуха через вентиляционную трубу.

Для различных категорий состояний атмосферы и различных составляющих выбросов определены:

- опасная скорость ветра;
- максимальные концентрации радионуклидов в приземном слое атмосферы при опасной и заданной скоростях ветра.

Представлены графические зависимости, иллюстрирующие найденные величины.

					<b>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		140

## Список используемых источников

1. ОКБ «Гидропресс» — разработчик атомных реакторов [электронный ресурс]. Официальный сайт: <http://www.gidropress.podolsk.ru/>, свободный. Дата обращения: 10.09.2019 г.;

2. Альбом нейтронно-физических характеристик первой топливной загрузки энергоблока №3 Ростовской атомной станции: Отчет – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 2013. 449 с.;

3. Андрушечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000: Учебное пособие. – М.: Логос, 2010. – 604 с. + цв. вклейки;

4. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.: ил.;

5. Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н., Селеванникова О.В. Физический расчет ядерного реактора на тепловых нейтронах: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 504 с.;

6. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, В.Ф. Украинцев. – М.: Логос, 2010. – 604 с. + цв. вклейки;

7. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Учебное справочное пособие для студентов специальностей: 14.03.05 – Ядерные реакторы и энергетические установки, 14.04.04 – Атомные электрические станции и установки/ Под общ. ред. Проф. П.Л. Кириллова; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИздАт, 2007. – 200 с.;

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		141

8. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам: (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). Под общ. ред. П.Л. Кириллова – М.: Издательство АТП, 2015 год. – 296 с.;

9. Тимофеев В.А. Трехмерные гидродинамические CFD-расчеты течения теплоносителя в межтрубном пространстве при установленных перемешивающих и дистанционирующих решетках, 2013;

10. РБ-040-09. Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования водоохлаждаемых ядерных энергетических установок;

11. Рассохин, Николай Георгиевич. Парогенераторные установки атомных электростанций: учебное пособие / Н. Г. Рассохин. — 4-е изд., перераб. и доп. — М: Екатеринбург АТП 2015. — 384 с.;

12. Пузанов Д.Н., Стин А.А. Анализ и обобщение данных по свойствам циркониевых сплавов, применяющихся в качестве конструкционных материалов. Науч.-техн. конц. Молодых специалистов: Материалы конференции ОКБ «Гидропресс», 16 -17 марта 2011 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> . Дата обращения: 30.10.2019 г.;

13. Кириллов П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360с.: ил.;

14. Русьянов В.Г. Уплотнительные устройства разъемных соединений оборудования реакторных установок ВВЭР. – Москва: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 134 с.;

15. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки АЭС: Учеб. Пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384с.: ил.;

16. Основное оборудование реакторного отделения: Росэнергоатом.

					<b>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		142

Балаковская Атомная Электростанция. Служба подготовки персонала;

17. Лукасевич Б.И. и др. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004;

18. Н.Б. Трунов, В.В. Сотсков, В.С. Попадчук, и др. «Ускоренные коррозионные испытания моделей трубных пучков ПГВ-1000». 6-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам. 22-24 марта 2004 г. Сборник тезисов, ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Подольск, 2004;

19. А.В. Баранов, Н.Ф. Самусев, В.Н. Борисов; А.Р. Иванов. Замена штуцеров и патрубков с защитными рубашками на оборудовании и трубопроводах АЭС с ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации на штуцера и патрубки из стали 08X18H10T с антикоррозионной наплавкой стенок корпусов оборудования или ГЦТ. 7-й международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». 17-20 мая 2011 г.;

20. Воробьев А.В., Антонова А.М. Парогенераторы АЭС. Основные конструкции и проектирование: учебное пособие / А.В. Воробьев, А.М. Антонова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 177 с.;

21. Зорин В.М. Атомные электростанции: учебное пособие / В.М. Зорин. – М: Издательский дом МЭИ, 2012. – 642 с.: ил.;

22. Антонова А.М., Воробьев А.В. Атомные электростанции: учебное пособие / А.М. Антонова, А.В. Воробьев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 230 с.;

23. Стерман Л.С. Тепловые и атомные электрические станции: учебник для вузов: / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 464 с., ил.;

24. Расчёт 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.;

					<b>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		143

25. Расчет стационарных теплообменников, авт. В.Я Гиршфельд, А.М. Князев, В.Е.Куликов;
26. Григорьев В.А., Зорин В.М. Тепловые и атомные электрические станции: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. М.: Изд-во: Энергоатомиздат, 1989. - 608 с.;
27. РТМ 108.271.23-84;
28. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1900. -352 с.: ил.;
29. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. Учебн. Пособие для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.: 117 ил.;
30. Никитина И.К. Справочник по трубопроводам тепловых электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176с., ил.;
31. Стерман Л.С. Тепловые и атомные электрические станции: учебник для вузов: / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 464 с., ил.;
32. Диаметры стальных трубопроводов ГОСТ 10704-91;
33. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;
34. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»;
35. Р 2.2.2006-05 «Руководство, по гигиенической оценке, факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда»;
36. Безопасность жизнедеятельности. Практикум Бородин Ю. В. и др ТПУ, 2009, 101 с.;
37. ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1);

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		144

38. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – СПб.: УВСИЗ, 2005;
39. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов;
40. ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты;
41. СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»;
42. СанПиН 2.6.1.23-03 «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации ядерных реакторов исследовательского назначения»;
43. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация: учебное пособие для вузов / М.А. Скачек. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014. — 552 с.: ил.;
44. ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты;
45. ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»;
46. Консультант плюс – сайт консультант плюс. [Электронный ресурс] / URL: <http://www.consultant.ru/cons/>. Дата обращения 24.12.19 г.;
47. Волошенко А.В., Горбунов Д.Б. Проектирование систем автоматического контроля и регулирования. Томск. – Изд. ТПУ, 2011;
48. Атрошенко Ю.К., Иванова Е.В. Автоматизированные системы управления АЭС: учебное пособие. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 81 с.;
49. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов ТЭС и АЭС. – Одесса: Астропринт, 2001. – 305 с.

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		145

## Приложение А

(справочное)

Таблица А.1 – Характеристики ТВС-2М (прототип)

Наименование характеристики, единицы измерения	Значение
<p>Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛЫ и ТВЭГИ):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- количество ТВЭЛОВ и ТВЭГОВ в ТВС, шт</li> <li>- шаг между ТВЭЛАМИ (ТВЭГАМИ), мм</li> <li>- высота топлива в холодном/горячем состоянии, мм</li> <li>- наружный диаметр оболочки ТВЭЛА (ТВЭГА), мм</li> <li>- внутренний диаметр оболочки ТВЭЛА (ТВЭГА), мм</li> <li>- материал оболочки и заглушек ТВЭЛА (ТВЭГА)</li> <li>- масса топлива (UO<sub>2</sub>) в ТВЭЛЕ, кг, номинальная</li> <li>- масса топлива (UO<sub>2</sub> + Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в ТВЭГЕ, кг, номинальная:</li> <li>1) для содержания Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5%</li> <li>2) для содержания Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более 5%</li> </ul>	<p>312</p> <p>12,75 ± 0,30</p> <p>3730/3750</p> <p>9,10 ± 0,04</p> <p>7,73+0,06</p> <p>Сплав Э-110</p> <p>1,689</p> <p>1,689</p> <p>1,673</p>
<p>Таблетка ТВЭЛА:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- материал топливной таблетки ТВЭЛА</li> <li>- наружный диаметр таблетки, мм</li> <li>- диаметр центрального отверстия таблетки, мм</li> <li>- высота таблетки, мм</li> <li>- обогащение топлива по изотопу <sup>235</sup>U (максимальное значение в стационарной кампании), массовый %</li> </ul>	<p>Спеченный диоксид урана UO<sub>2</sub></p> <p>7,60-0,03</p> <p>1,2+0,2</p> <p>9 – 12</p> <p>4,95</p>
<p>Таблетка ТВЭГА:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- материал топливной таблетки ТВЭГА</li> <li>- наружный диаметр таблетки, мм</li> <li>- диаметр центрального отверстия таблетки, мм</li> <li>- высота таблетки, мм</li> <li>- содержание оксида гадолиния в материале топливной таблетки, (максимальное значение), массовый %</li> </ul>	<p>Спеченный диоксид урана с оксидом гадолиния (UO<sub>2</sub>+Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</p> <p>7,6-0,03</p> <p>1,2+0,2</p> <p>9 – 12</p> <p>8</p>
<p>Направляющий канал:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- количество, шт</li> <li>- материал</li> <li>- наружный диаметр, мм, номинальный</li> <li>- внутренний диаметр, мм, номинальный</li> </ul>	<p>18</p> <p>сплав Э-635</p> <p>13,0</p> <p>11,0</p>

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	

**ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ**

Лист

146

Наименование характеристики, единицы измерения	Значение
Дистанционирующая решетка: - материал - количество (на уровне топлива), шт - масса, г	сплав Э-110 12 900
Центральная труба (под КНИ): - количество, шт - материал - наружный диаметр, мм, номинальный - внутренний диаметр, мм, номинальный	1 сплав Э-635 13,0 11,0

Таблица А.2 – Описание типов ТВС-2М первой топливной загрузки

Тип ТВС	Кол-во ТВС в активной зоне, шт.	Среднее обогащение топлива, <sup>235</sup> U вес. %	Количество твэлов, шт./обогащение, <sup>235</sup> U вес. %		Характеристики твэл с гадолинием (ТВЭГОВ)		
			Тип 1	Тип 2	Количество твэгов	Обогащение твэгов, <sup>235</sup> U вес.%	Содержание Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , вес. %
U19	48	1,900	312 / 1,9	-	-	-	-
U19X6	16	1,900	306 / 1,9	-	6	1,9	8
U33W2	24	3,265	300 / 3,3	-	12	2,4	8
U36	12	3,600	312 / 3,6	-	-	-	-
U36W2	6	3,554	300 / 3,6	-	12	2,4	8
U39	24	3,915	246 / 4,0	66 / 3,6	-	-	-
U39B6	9	3,902	240 / 4,0	66 / 3,6	6	3,3	5
U39A8	24	3,883	234 / 4,0	60 / 3,6	18	3,3	5



Таблица Б.3 - Коэффициент запаса по высоте твэла

$z, \text{ м}$	$X$	$q_{кр}, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$	$q_s, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$	$k_{зап}$
-1,865	-2,126	1421,73	82,9	17,15
-1,243	-1,984	1414,73	689,27	2,05
-0,622	-1,649	1397,16	1125,52	1,24
0	-1,204	1371,47	1283,98	1,06
0,622	-0,759	1342,83	1125,52	1,19
1,243	-0,424	1319,40	389,27	1,91
1,865	-0,281	1309,0	82,9	15,79

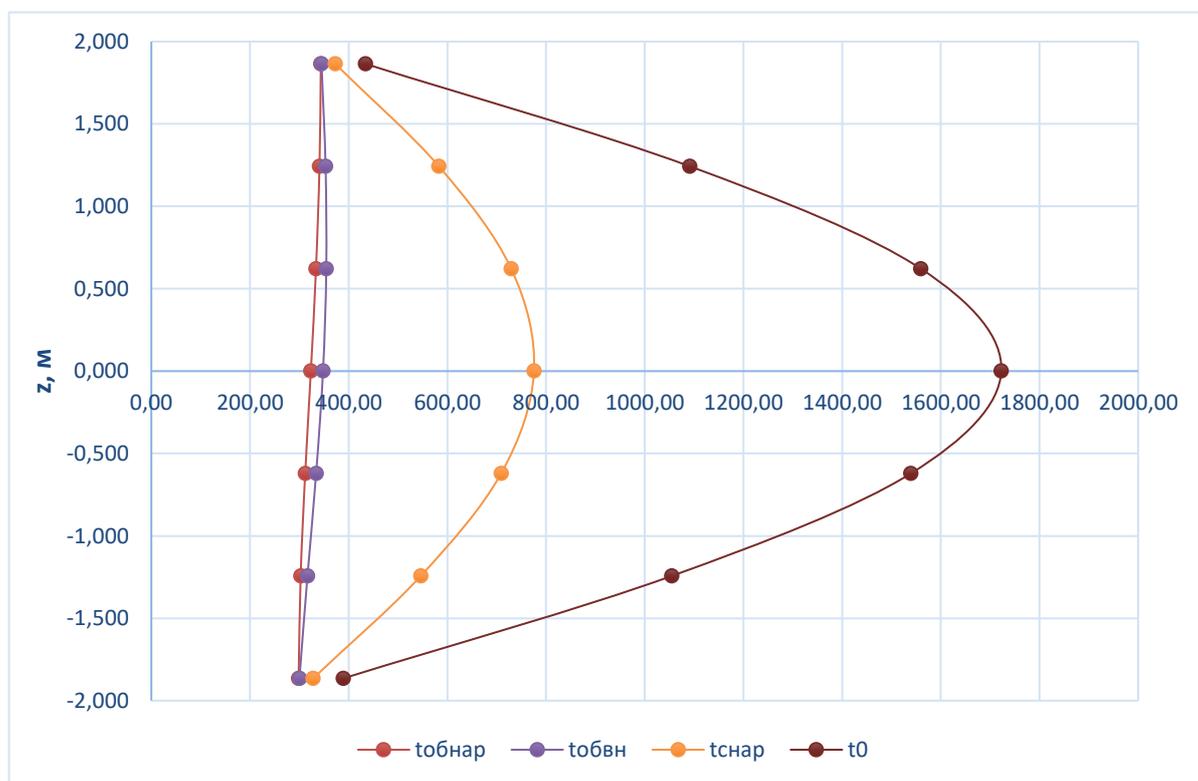


Рисунок Б.1 - Распределение температур твэла по высоте АЗ

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата
------	------	-------------	---------	------

ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ

Лист

149

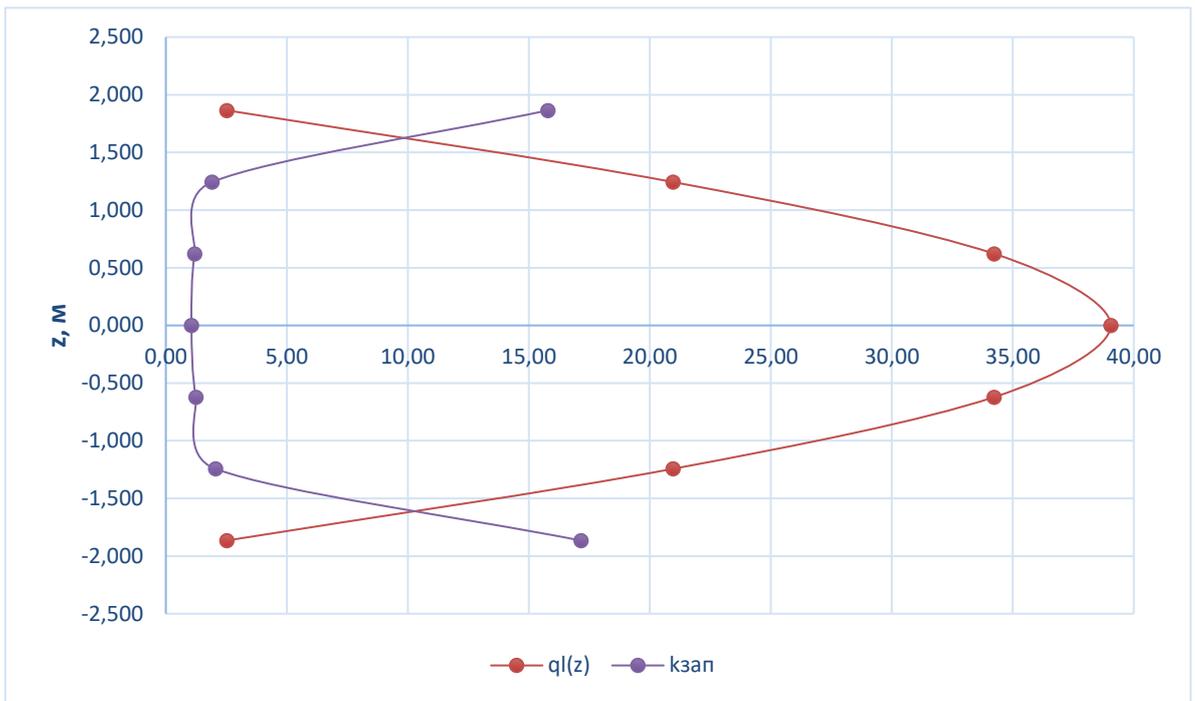


Рисунок Б.2 - Зависимость линейного теплового потока и коэффициента запаса от высоты

## Приложение В

(обязательное)

Таблица В.1 – Данные предварительного конструкторского расчета для трех ПГ

Величина	Значение	Величина	Значение
$G$ , кг/с	5,797	$L_{K1}$ , м	3,629
$D$ , кг/с	552,9	$N_{TP1}$ , шт.	127
$d_{с.к.}$ , мм	1295	$B_{II}$ , м	4,245
$s_{2к.с.}$ , мм	25,8	$X_{OC}$ , м	2,123
$\varphi_1$	0,349	$W_{IP}$ , м/с	0,4
$\varphi_2$	0,915	$B_{к.пдл}$ , м	4,757
$\delta_k^p$ ,	145	$B_{пдл}$ , м	4,457
$d_{н.к.}$ , мм	1445	$D_{Б.ВН}$ , м	4,841

Таблица В.2 – Данные уточненного конструкторского расчета для трех ПГ

Величина	Значение	Величина	Значение
$G$ , кг/с	5797,1	$L_{K1}$ , м	3,92
$D$ , кг/с	552,9	$N_{TP1}$ , шт.	129
$d_{вн.к.}$ , мм	937	$B_{II}$ , м	4,247
$d_{с.к.}$ , мм	1077	$X_{OC}$ , м	2,123
$s_{2к.с.}$ , мм	26,4	$W_{IP}$ , м/с	0,3
$\varphi_1$	0,341	$B_{к.пдл}$ , м	4,759
$\varphi_2$	0,939	$B_{пдл}$ , м	4,459
$\delta_k^p$ ,	155	$D_{Б.ВН}$ , м	4,843
$d_{н.к.}$ , мм	1247	$L_{K1}$ , м	3,92

## Приложение Г (обязательное)

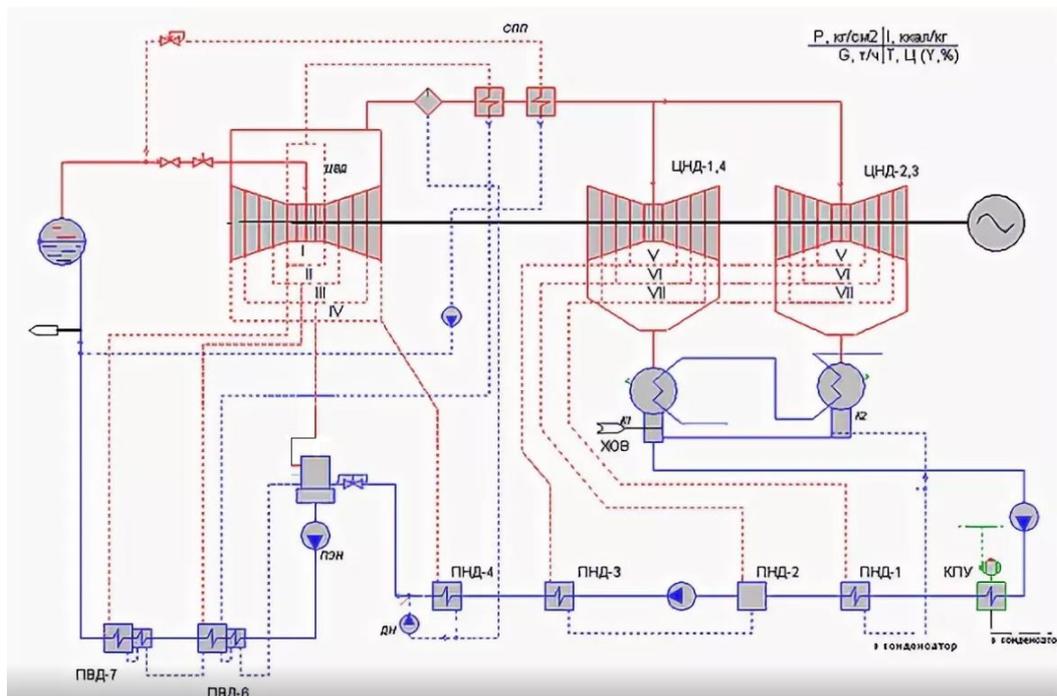


Рисунок Г.1- Принципиальная тепловая схема турбоустановки К-1200-6,8/50

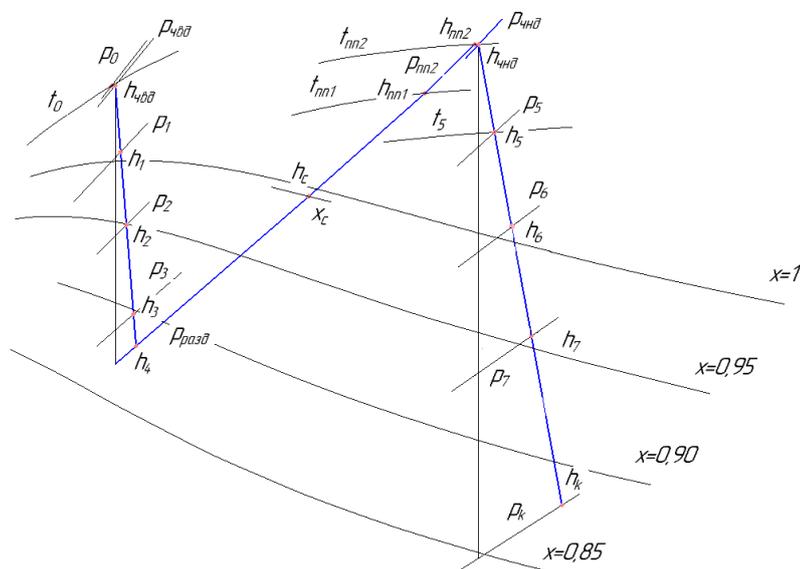


Рисунок Г.2 - h-s диаграмма процесса расширения пара в турбине

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	Лист 152
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

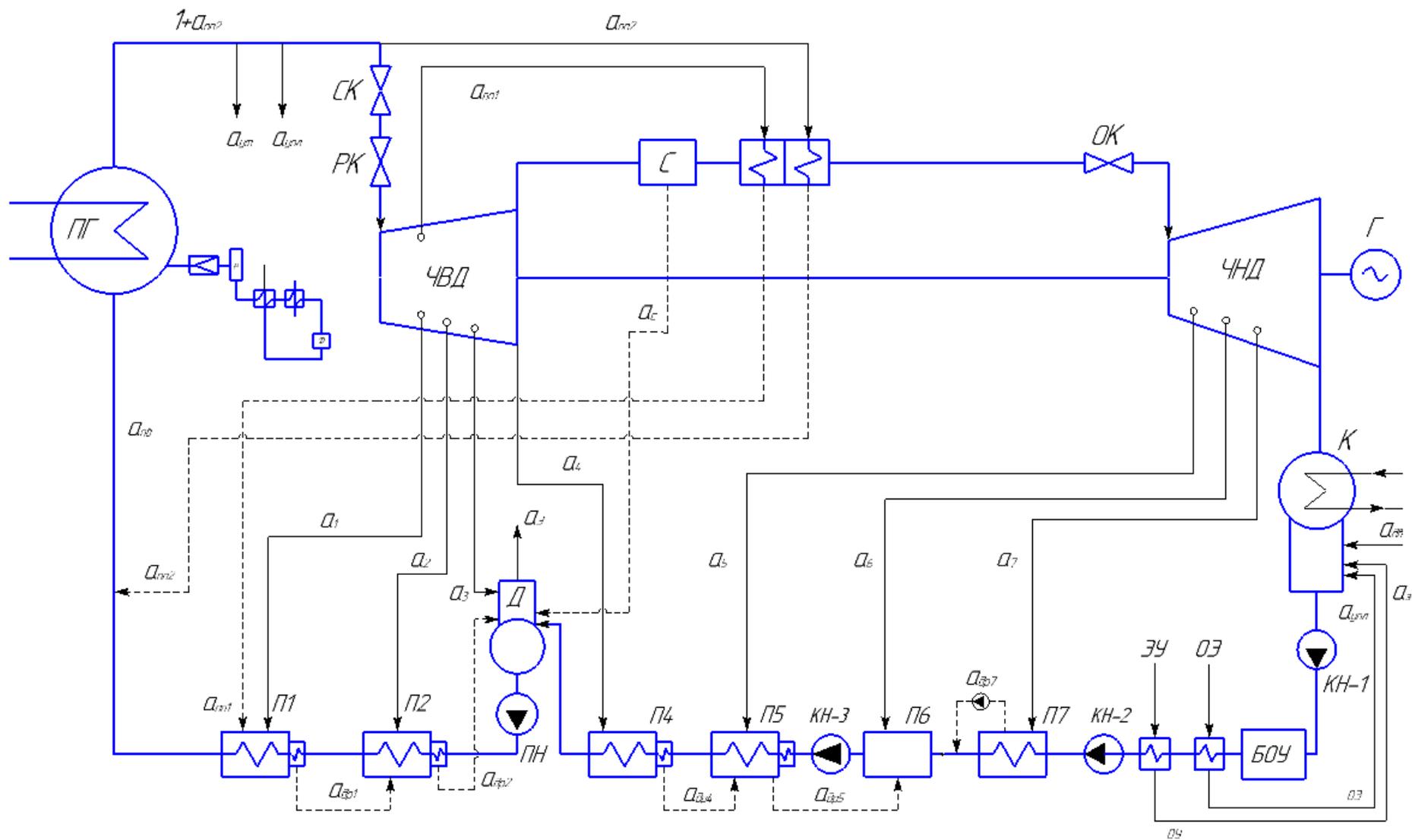


Рисунок Г.3 - Принципиальная схема рассчитываемой установки

Таблица Г.1 – Параметры воды и пара в ключевых точках

№	Пар в отборе		КГП			ОД		Питательная вода, основной конденсат			$y_j$
	$p_{пj}$	$h_{пj}$	$p_{дрj}$	$t_{дрj}$	$h_{дрj}$	$t_{окj}$	$h_{окj}$	$p_{вj}$	$t_{вj}$	$h_{вj}$	
	МПа	кДж/кг	МПа	°С	кДж/кг	°С	кДж/кг	МПа	°С	кДж/кг	
ЧВД	6,5	2903	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	3,01	2779	2,87	231,4	997	211,5	904,9	8,29	228,5	984	0,875
2	1,94	2708	1,85	208,5	891	191,5	815	8,29	205,5	880	0,803
3	1,08	2620	1,03	181,2	763	-	-	1,03	181,2	763	0,715
4	0,696	2558	0,663	162,8	688	140,1	590	1,24	166,2	703	0,653
С	0,68	2751	0,68	163,8	692	-	-	-	-	-	0,653
ПП1	0,66	2879	2,87	231,4	997	-	-	-	-	-	-
ПП2	0,65	2981	6,59	281,8	1246	-	-	-	-	-	-
ЧНД	0,64	2981	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0,339	2862	0,323	136,1	572	108	453	1,24	134,1	565	0,533
6	0,113	2689	-	-	-	-	-	0,129	102	428	0,359
7	0,0347	2536	0,033	71,3	299	-	-	0,129	69,9	293	0,205
К	0,005	2332	-	-	-	-	-	0,005	32,8	138	0

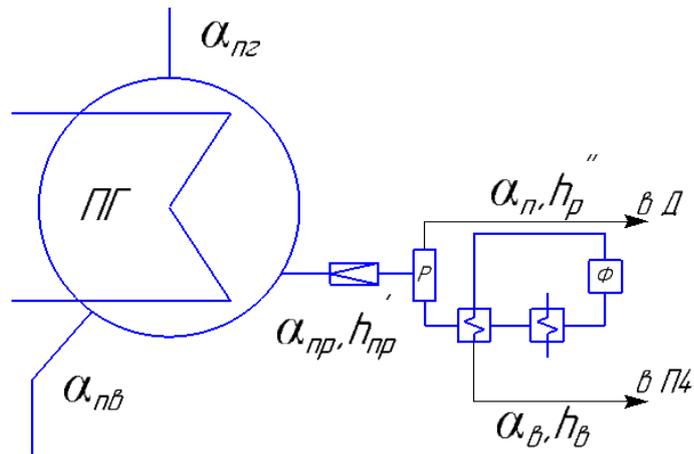


Рисунок Г.4 - Схемы расширителя, охладителя и дохладителя непрерывной продувки ПГ

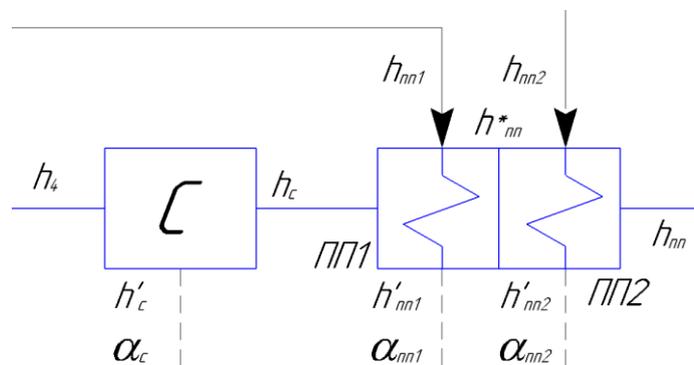


Рисунок Г.5 – Расчетная схема 2-х ступенчатого сепаратора-пароперегревателя

Таблица Г.2 - Выбранное оборудование подогревателей [26]

Вид подогрев.	Расчетное значение		Номинальное значение					
	$F$	$G_{пв,ок,св}$	Тип подогревателя	$F$	$G_{пв,ок,св}$	$P_n$	$P_в$	Кол-во
	$м^2$	$кг/с$		$м^2$	$кг/с$	$МПа$	$МПа$	Шт.
ПВД 1	3826	1545,7	ПВ-2500-97-28А	2500	908	2,8	9,7	2
ПВД 2	4109	1545,7	ПВ-2500-97-28А	2500	908	2,8	9,7	2
ПНД 4	3525	1156,3	ПН-3200-30-16-ПА	3200	1430,6	1,6	3,0	1
ПНД 5	3500	1156,3	ПН-3200-30-16-ПА	3200	1430,6	1,6	3,0	1
ПНД 6*	364	1156,3	ПНСГ-4000-ПА	125	1041,3	-	-	1
ПНД 7	2965	856,5	ПН-3000-25-16-ПА	3000	1112,5	1,6	2,5	1

Примечание\*. Для ПНД6 показан объем в  $м^3$ .

## Приложение Д

(обязательное)

2. По результатам вариантных расчетов строятся зависимости от скорости ветра:

- изменения максимальных концентраций РБГ, йода и аэрозолей в приземном слое атмосферы от скорости ветра;

- координаты максимумов концентрации йода, аэрозолей и РБГ в приземном слое от скорости ветра.

Таблица Д.1 - Изменение максимальных концентраций и координаты максимумов концентрации РБГ, йода и аэрозолей в приземном слое атмосферы

Скорость ветра $U$ , м/с	Йод		Аэрозоли		РБГ	
	$C_m$ , Бк/м <sup>3</sup>	$X_m$ , м	$C_m$ , Бк/м <sup>3</sup>	$X_m$ , м	$C_m$ , Бк/м <sup>3</sup>	$X_m$ , м
0,2	0,000325	5000	0,0144	1200	13,5	5000
0,5	0,000589	2850	0,00299	1500	23,9	2900
1	0,000653	2000	0,00124	1450	26,3	2000
1,5	0,000621	1700	0,000812	1400	24,9	1700
2	0,000574	1550	0,00062	1350	23	1550
2,5	0,000528	1500	0,000508	1300	21,2	1500
3	0,000487	1400	0,000433	1300	19,5	1400
3,5	0,000451	1350	0,000379	1250	18,1	1350
4	0,00042	1300	0,00031	1200	16,9	1300

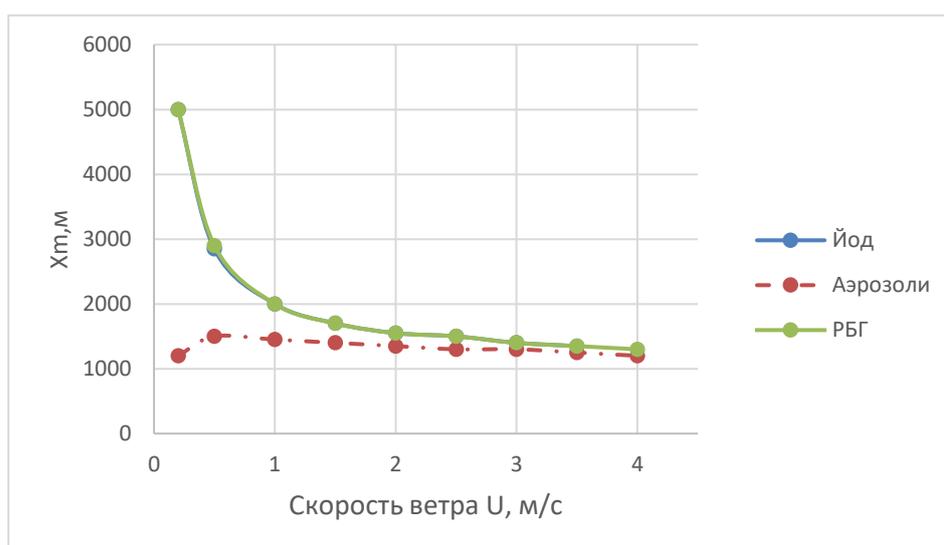


Рисунок Д.1 – Зависимость координаты максимума концентрации йода, аэрозолей и РБГ в приземном слое от скорости ветра

Вывод: концентрации составляющих выбросов уменьшаются с увеличением скорости ветра. При заданной скорости ветра  $U = 4$  м/с концентрация аэрозолей более чем в 10 раз ниже, чем при опасной скорости ветра. Для йода и РБГ концентрации снижаются в 1,55 и 1,55 раза, соответственно.

Из рисунка Е.4 можно сделать вывод, что график зависимости координаты максимума концентраций йода и РБГ снижаются по зависимости, схожей с экспоненциальной. При скорости ветра более 2 м/с снижения минимально и практически не наблюдается. Координата максимума концентрации аэрозолей увеличивается с увеличением скорости ветра, и при скорости ветра 2 м/с данная кривая достигает «насыщения».

					<b>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		157

## Приложение Е

(справочное)

Таблица Е.1 – Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны оператора

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	1а	22...24	16...24	40-60	0,1
Теплый	1а	23...25	14...27	40-60	0,1

Таблица Е.2 – Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры

Характеристика помещения	Объемный расход подаваемого в помещение свежего воздуха, м <sup>3</sup> /на одного человека в час
Объем до 20 м <sup>3</sup> на человека 20...40 м <sup>3</sup> на человека более 40 м <sup>3</sup> на человека	не менее 30 не менее 20 естественная вентиляция

Таблица Е.3 – Нормы классов условий труда по монотонности нагрузки и оценка труда оператора

Показатели напряженности трудового процесса	Класс условий труда				Труд оператора
	Оптимальный	Допустимый	Вредный		Вредный
	Напряженность труда легкой степени	Напряженность труда средней степени	Напряженный труд		Напряженный труд
			1 степени	2 степени	
1. Число элементов (приемов), необходимых для реализации простого задания или в многократно повторяющихся операциях	более 10	9-6	5-3	менее 3	менее 3

2. Продолжительность (в с) выполнения простых заданий или повторяющихся операций	более 100	100-25	24-10	менее 10	менее 10
3. Время активных действий (в % к продолжительности смены). В остальное время - наблюдение за ходом производственного процесса	20 и более	19-10	9-5	менее 5	менее 5
4. Монотонность производственной обстановки (время пассивного наблюдения за ходом техпроцесса в % от времени смены)	менее 75	76-80	81-90	более 90	более 90

Таблица Е.4 – Напряжения прикосновения и токи при нормальном режиме электроустановки при продолжительности воздействия не более 10 мин в сутки

Род тока	U, В	I, мА
	не более	
Переменный, 50 Гц	2	0,3

Таблица Е.5 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме электроустановок с частотой тока 50 Гц и напряжением до 1000 В

Продолжительность воздействия t, с	Нормируемая величина	
	U, В	I, мА
От 0,01 до 0,08	220	220
0,1	200	200
0,2	100	100
0,3	70	70
0,4	55	55
0,5	50	50
0,6	40	40
0,7	35	35
0,8	30	30
0,9	27	27
1	25	25

## Приложение Ж (обязательное)

Расчёт требуемого воздухообмена в помещении.

Определение требуемого воздухообмена производится по количеству углекислоты, выделяемой человеком и по допустимой ее концентрации.

Кратность воздухообмена определяется по формуле из [4]:

$$n = \frac{L}{V_n} \cdot \frac{1}{\tau}$$

где  $V_n = 40 \text{ м}^3$  – внутренний объем помещения МОТО;  $L$  – воздухообмен.

Требуемый воздухообмен определяется по формуле из [5]:

$$L = \frac{G}{x_b - x_n} \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$$

где  $G, \text{ л/ч}$  – количество вредных веществ, выделяющихся в воздух помещения;  $x_b, \text{ мг/м}^3$  – предельно допустимая концентрация вредности в воздухе рабочей зоны помещения, согласно [5];  $x_n, \text{ мг/м}^3$  – максимально возможная концентрация той же вредности в воздухе населенных мест.

В жилых и общественных помещениях постоянным вредным выделением является выдыхаемая людьми углекислота ( $\text{CO}_2$ ).

Содержание углекислоты в атмосферном воздухе можно определить по химическому составу воздуха. Однако, учитывая повышенное содержание углекислоты в атмосфере населенных пунктов, следует принимать при расчете содержание  $\text{CO}_2$ :

- для сельских населенных пунктов -  $0,33 \text{ л/м}^3$ ;
- для малых городов (до 300 тыс. жителей) -  $0,4 \text{ л/м}^3$ ;
- для больших городов (свыше 300 тыс. жителей) -  $0,5 \text{ л/м}^3$ .

Количество  $\text{CO}_2$ , выделяемое одним взрослым человеком при выполнении легкой работы (в учреждениях)  $g = 23 \text{ л/ч}$ .

Допустимая концентрация  $\text{CO}_2$  в учреждениях  $x_b = 1,25 \text{ л/м}^3$  и содержание  $\text{CO}_2$  в наружном воздухе для больших городов принимаем  $x_n = 0,5 \text{ л/м}^3$ .

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		160

Определяем требуемый воздухообмен:

$$L = \frac{G}{x_B - x_H} = \frac{(23 \cdot 1)}{1,25 - 0,5} = 30,67 \frac{\text{м}^3}{\text{час}},$$

Таким образом, кратность воздухообмена будет равна:

$$n = \frac{30,67}{34} = 0,902.$$

Данное значение кратности воздухообмена показывает, что объём воздуха в помещении МОТО достаточен для естественного воздухообмена.

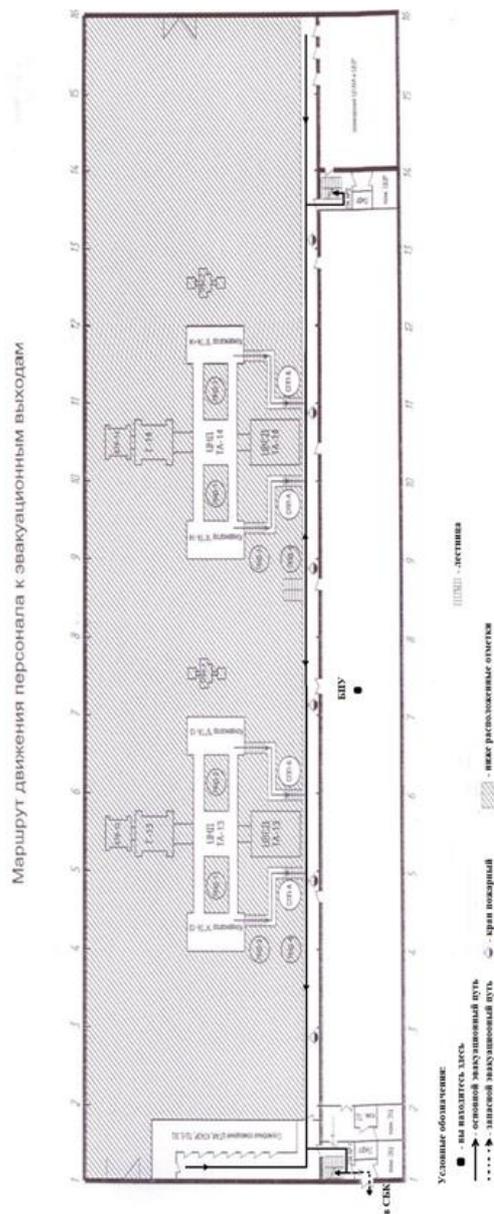


Рисунок Ж.1 – План эвакуации помещения БПУ

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ

Лист

161

## Приложение И

(обязательное)

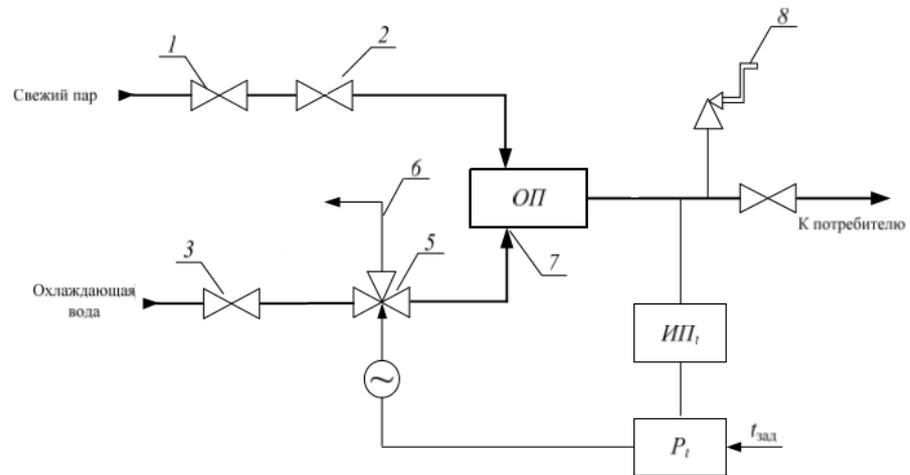


Рисунок И.1 - Принципиальная схема АСР РОУ:

1 – входная задвижка; 2 – дроссельный клапан; 3 – водяная задвижка; 5 – регулирующий клапан; 6 – сливная линия; 7 – форсунка; 8 – предохранительное устройство; ОП – охладитель пара; ИП<sub>1</sub> - измерительный преобразователь температуры; Р<sub>t</sub> – регулятор температуры;  $t_{зад}$  – заданное значение температуры

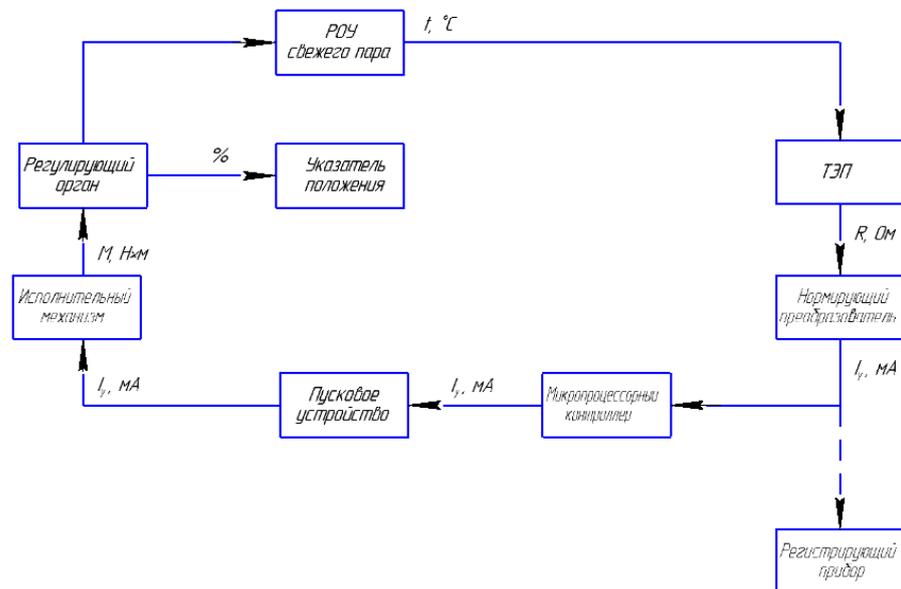


Рисунок И.2 - Структурная схема АСР системы регулирования температуры свежего пара поле РОУ

					<b>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		162

