

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

Институт: Энергетический  
Специальность: 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг  
Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

Тема работы
<b>ПРОЕКТ МОДЕРНИЗАЦИИ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С РЕКТОРОМ ВВЭР-1000</b>

УДК 621.311.25:621.039.56-048.35(470.61)

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>5012</b>	<b>Савина Карина Ивановна</b>		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>ст. преподаватель кафедры АТЭС</b>	<b>С.В. Лавриненко</b>	-		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>доцент кафедры менеджмента</b>	<b>С.И. Сергейчик</b>	<b>к.т.н., доцент</b>		

По разделу «Социальная ответственность»

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

По разделу «Автоматизация технологических процессов и производств»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>доцент кафедры автоматизации тепло- энергетических про- цессов</b>	<b>В.С. Андык</b>	<b>к.т.н., доцент</b>		

Нормоконтроль

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг, специализация подготовки «Проектирование и эксплуатация атомных станций»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
	<b>Универсальные компетенции</b>	
Р1	Использовать методологические основы современной картины мира для научного познания и творчества, выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК- 1, ПК-10), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р2	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	Требования ФГОС (ОК-2, 5, 9), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р3	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе на иностранном <i>языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и публично защищать результаты, владеть методами пропаганды научных достижений	Требования ФГОС (ОК-3 – 5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р4	Использовать системный подход в профессиональной деятельности, ставить цели и выбирать пути их достижения, обобщать, анализировать, критически осмысливать, систематизировать	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р5	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	Требования ФГОС (ОК-7 ПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Код ре- зуль- тата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
Р6	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	Требования ФГОС (ОК-8; ОПК-1, ПК-7, 19), Критерий 5 АИОР (п. 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р7	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	Требования ФГОС (ОК-10, 13, 14, ПК-3), Критерий 5 АИОР (пп.2.3, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р8	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	Требования ФГОС (ОК-12, ПК-2, 6, 13, 26, ПСК-1.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
	<b>Профессиональные компетенции</b>	
Р9	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	Требования ФГОС (ПК-4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р10	Использовать глубокие математические, естественнонаучные знания в профессиональной деятельности с применением математического моделирования объектов и процессов в области проектирования и эксплуатации АС	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-9 – 11), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р11	Проводить <i>инновационные</i> научные исследования систем и оборудования атомных электрических станций и ядерных энергетических установок, участвовать во внедрении результатов исследований	Требования ФГОС (ОПК-2, ПК-5, 9, 14, 15, 16), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Код ре- зультата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
		ный с требованиями между- народных стандартов <i>EUR- ACE</i> и <i>FEANI</i>
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	Требования ФГОС (ПК-12; 17, 20), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P13	Выбирать, создавать и использовать оборудование атомных электрических станций и ядерных энергетических установок, средства измерения теплофизических параметров и автоматизированного управления, защиты и контроля технологических процессов	Требования ФГОС (ОПК-3, ПК-18), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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</i> и специальных знаний, современных методов проектирования для достижения оптимальных результатов с учетом принципов и средств обеспечения ядерной и радиационной безопасности	Требования ФГОС (ПК-20, 21, 23 – 25, ПСК-1.5, 1.6, 1.8, 1.10), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P15	Разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы в области проектирования АС	Требования ФГОС (ПК-22), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P16	Анализировать нейтронно-физические, технологические процессы и алгоритмы контроля, диагностики, управления и защиты, проводить нейтронно-физические, теплогидравлические и прочностные	Требования ФГОС (ПК-27, 28, ПСК-1.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Код ре- зуль- тата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
	расчеты оборудования АС и его элементов в стационарных и нестационарных режимах работы	ный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P17	Делать оценку ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации ядерных энергетических установок, а также при обращении с ядерным топливом и другими отходами	Требования ФГОС (ПК-29), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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	Требования ФГОС (ПК- 28, 10, 11, , ПСК-1.14, 1.15), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P19	Анализировать технологии монтажа, ремонта и демонтажа оборудования АС применительно к условиям сооружения, эксплуатации и снятия с эксплуатации энергоблоков АС	Требования ФГОС (ПК-13,14), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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	Требования ФГОС (ПСК-1.9), Критерий 5 АИОР (п. 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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	Требования ФГОС (ПСК-1.9), Критерий 5 АИОР (п. 2.2, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Код ре- зуль- тата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
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	Требования ФГОС (ПСК-1.11), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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	Требования ФГОС (ПСК-1.1, 1.3, 1.7), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P24	Проводить физические эксперименты на этапах физического и энергетического пуска энергоблока с целью определения нейтронно-физических параметров реакторной установки и АС в целом	Требования ФГОС (ПСК-1.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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	Требования ФГОС (ПК-8, ПСК-1.12, 1.13), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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



Институт: Энергетический  
 Специальность: 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг  
 Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН  
 А.С. Матвеев

\_\_\_\_\_  
 (Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

**ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА**

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
<b>5012</b>	<b>Савиной Карине Ивановне</b>

Тема работы:

**ПРОЕКТ МОДЕРНИЗАЦИИ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС  
 С РЕКТОРОМ ВВЭР-1000**

Утверждена приказом директора (дата, номер)	<b>11.11.2016 г. №9734</b>
---------------------------------------------	----------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	<b>23 января 2017 г.</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>Объект проектирования – Парогенератор энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000.                      Режим работы – непрерывный.                      Исходные данные для расчета – Основные технические характеристики ПГ-1000М                      Прототип– ПГ-1000М                      Источник тепла – ядерный реактор ВВЭР-1000.                      Климатические условия – г. Волгодонск.</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; обсужде-</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Сформулировать цели и задачи проектирования.</li> <li>Представить принципиальную тепловую и конструкционную схемы, описание и принцип работы ПГ, технические характеристики ПГ РосАЭС.</li> <li>Провести расчет парогенератора. Определить мощность, количество трубок, площадь поверхности теплообмена, геометрические размеры и гидравлические сопротивления 1-го и 2-го контуров</li> </ol>

<p>ние результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p>ПГ. Представить конструкцию проектируемого ПГ на чертеже.</p> <p>4. Определить экономические затраты на модернизацию ПГ.</p> <p>5. Проанализировать рабочие места в реакторном отделении на предмет выявления основных опасностей и вредностей, оценить степень воздействия их на персонал и природную среду.</p> <p>6. Сформулировать основные выводы работы.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>1. Тепловая схема турбоустановки К-1000-60/1500-2.</p> <p>2. Парогенератор ПГВ-1000М. Сборочный чертеж</p> <p>3. Схема расположения парогенераторов</p> <p>4. Функциональная схема системы регулирования уровня в парогенераторе.</p>

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p><b>1. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b></p>	<p>Сергейчик С.И., доцент кафедры менеджмента</p>
<p><b>2. Социальная ответственность</b></p>	<p>Амелькович Ю.А., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности</p>
<p><b>3. Автоматизация технологических процессов</b></p>	<p>Андык В.С., доцент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов</p>

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>22 июня 2016 г.</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель кафедры АТЭС	С.В. Лавриненко	-		22.06.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5012	Савина Карина Ивановна		22.06.2016



## Реферат

Выпускная квалификационная работа 106 с., 11 рис., 9 табл., 27 источников, 1 прил.

Ключевые слова: модернизация, парогенератор, высоконикелевый сплав, насыщенный пар, теплообменные трубы.

Объектом исследования является ПГ энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Цель работы – провести расчет ПГ с теплообменными трубки из высоконикелевого сплава 03X21H32M3B (ЧС-33).

В процессе исследования проводились тепловой и конструкторский расчеты ПГ, расчет сепарации и гидравлический расчет.

В результате исследования выявили более оптимальные геометрические размеры теплообменных трубок.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: теплоноситель – вода под давлением, на входе в ПГ давление 15,69 МПа и температура 320 °С, на выходе температура 289,7 °С; рабочее тело – насыщенный пар с температурой 278,5 °С.

Степень внедрения: данный проект может быть использован на энергоблоках с реактором ВВЭР.

Область применения: горизонтальные ПГ насыщенного пара.

Экономическая эффективность/значимость работы: увеличение срока службы парогенератора.

В будущем планируется использовать полученные конструкционные характеристики для новых энергоблоков с реактором ВВЭР.

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

## Список обозначений и сокращений

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами;

АЭС - атомная электрическая станция;

БОУ – блочная обессоливающая установка;

БЩУ – блочный щит управления;

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

ВХР – водно-химический режим;

КМ – конструкционный материал;

КПД - коэффициент полезного действия;

ОД - охладитель дренажа;

ПВ – питательная вода;

ПГ – парогенератор;

ПТУ - паротурбинная установка;

РТ – рабочее тело;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

ТН – теплоноситель;

ТОТ – теплообменные трубки;

ТЭС - тепловая электрическая станция;

ЭБ - энергоблок.

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>15</b>
<b>1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ.....</b>	<b>16</b>
<b>2. РАСЧЕТ ПАРОГЕНЕРАТОРА.....</b>	<b>18</b>
2.1. Исходные данные.....	18
2.2. Принципиальная тепловая схема ПГ.....	18
2.3. Конструкционная схема ПГ.....	19
2.4. Тепловой мощность парогенератора. Расход теплоносителя. t-Q диаграмма.....	20
2.5. Число труб теплопередающей поверхности.....	23
2.6. Тепловой расчет.....	23
2.7. Конструкторский расчет ПГ.....	33
2.8. Расчет сепарации.....	45
2.9. Гидравлический расчет.....	52
<b>3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....</b>	<b>61</b>
<b>4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....</b>	<b>69</b>
4.1. Производственная безопасность.....	70
4.2. Экологическая безопасность.....	79
4.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	83
4.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасно- сти.....	85
4.5. Расчет освещения на блочном щите управления.....	88
<b>5. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ПГ.....</b>	<b>90</b>
5.1. Определение объема контроля и автоматизации ПГ.....	90
5.2. Выбор принципиальной схемы контроля и автоматизации ПГ....	91
5.3. Выбор структурной схемы контроля и автоматизации ПГ.....	92
5.4. Разработка функциональной схемы систем контроля и автоматизации ПГ.....	93

5.5. Выбор технических средств для реализации систем контроля и автоматизации ПГ и составление заказной спецификации.....	94
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>99</b>
<b>СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА.....</b>	<b>100</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>101</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>104</b>

ГРАФИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ:

ФЮРА.311115.002 ТЗ – Тепловая схема турбоустановки К-1000-60/1500-2.

ФЮРА.693410.003 СБ – Парогенератор ПГВ-1000М. Сборочный чертеж.

ФЮРА.693410.004 МЧ – Схема расположения парогенераторов.

ФЮРА.421000.005 С2 – Функциональная схема системы регулирования уровня в парогенераторе.

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

## ВВЕДЕНИЕ

Атомная электростанция – это промышленное предприятие, являющееся частью топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России. В свою очередь ТЭК – это отрасль промышленности, обеспечивающая топливом и энергией хозяйство страны и ее население. Назначение АЭС – производство электроэнергии при параллельной работе с остальными электростанциями ТЭК.

В настоящее время АЭС вырабатывает примерно 16 процентов электроэнергии в нашей стране. Несмотря на относительно долгое время строительства АЭС, себестоимость вырабатываемой электроэнергии на атомной станции гораздо ниже по сравнению с тепловыми электростанциями, использующими органическое топливо. Кроме того, на АЭС отсутствуют выбросы в атмосферу. Учитывая данные факторы в современных реалиях все большее внимание уделяется развитию атомной энергетики в России.

Атомная электростанция является очень сложным комплексом, состоящим из разнообразного и многочисленного оборудования с протекающими в нем разнообразными процессами. Все это оборудование объединено технологической схемой станции.

Парогенератор – неотъемлемая часть технологической схемы атомной электростанции с водоводяными энергетическими реакторами (ВВЭР), предназначен для выработки пара на турбогенератор для производительности электроэнергии. ПГ должен надежно во всех режимах работы АЭС обеспечить охлаждение активной зоны реактора.

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

## 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Основные проблемы эксплуатации как вертикальных, так и горизонтальных ПГ связано с коррозией. Долговечность работы теплообменных труб (ТОТ) является результатом сочетания множества факторов, включая: конструкцию ПГ, материал и технологию изготовления его элементов, водно-химический режим (ВХР), локальные и динамические изменения состава сред на поверхности при работе и хранении (консервации) ПГ и др [1].

В настоящее время в горизонтальных ПГ ТОТ изготавливают из стали 08Х18Н10Т. Приближенный срок службы для труб из этой стали в трубных системах ПГ составляют 30-40 лет. Преимущества нержавеющей стали являются: относительная дешевизна, технологическая отработанность.

Рассматривая коррозионные проблемы наиболее важным фактором являются условия эксплуатации, которые для данного материала обеспечивают подавление коррозионных процессов во всех режимах эксплуатации [2].

Основным недостатком нержавеющей стали является склонность к хлоридной коррозии под напряжением. ВХР при работе ПГ должен исключать условия возникновения данного вида коррозии, поскольку в воде отсутствует кислород, а содержание хлоридов, сульфатов и других примесей жестко нормируется. Вместе с тем локальные места накопления отложений продуктов коррозии на трубчатке могут приводить к накоплению хлоридов до величин на несколько порядков превышающих нормированные величины. Также возможно воздействие других окислителей вместо кислорода, например, меди. Таким образом, нарушения ВХР либо неконтролируемые процессы при локальном упаривании среды под отложениями приводят к коррозионному растрескиванию нержавеющей стали. Специальные меры должны быть применены, чтобы обеспечить подавление коррозии в стояночных или пусковых режимах, когда в ПГ проникает кислород воздуха.

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

Все это заставляет нас помимо совершенствования ВХР искать дополнительные возможности повышения коррозионной стойкости трубчатки. Альтернативой нержавеющей стали может выступать, например, высоконикелевый сплав типа 03X21H32M3Б (ЧС-33), который является близким аналогом сплава 800 имеющим положительный зарубежный опыт эксплуатации [2]. Высоконикелевый сплав 03X21H32M3Б обладает существенно более высокой коррозионной стойкостью трубчатки ПГ к питтингообразованию и коррозионному растрескиванию и коррозионно-механической прочностью в водных средах, благодаря высокому (20-23%) содержанию хрома, глубоко аустенитной структуре (31,5-33%Ni), низкому содержанию углерода (до 0,03%) и полной стабилизации ниобием (0,9-1,2%) [1]. Это дает ПГ повышенную устойчивость к возможным нарушениям ВХР, проектных условий хранения и эксплуатации. Сплав имеет более низкую теплопроводность в сравнении с нержавеющей сталью, что компенсируется более высокими механическими свойствами для уменьшения толщины стенки [2].

Для новых проектов энергоблоков необходимо повышенная надежность теплообменных труб, обеспечивающий срок службы ПГ 60 лет, независимо от вероятных случайностей. Исходя из выше изложенного высоконикелевый сплав обеспечит повышение долговечности и надежности ПГ при сроке службы 60 лет и более.

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

### 3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Рассмотрим экономический эффект от замены теплообменных трубок из стали 08Х18Н10Т на трубки из высоконикелевого сплава 03Х21Н32МЗБ.

#### 3.1. Расчет затрат на ТОТ

Диаметр трубки  $d_n = 16$  мм, толщина трубки  $\delta_{ст} = 1,2$  мм, плотность сплава  $\rho_{сплав} = 8110$  кг / м<sup>3</sup>, стоимость сплава  $C_{сплав} = 230$  руб / кг.

Масса одной трубы из сплава:

$$m_{тр} = \rho_{сплав} \cdot V_m,$$

где  $V_m$  - объем материала трубы на 1 м<sup>3</sup>.

$$V_m = S_{тр} \cdot l = \frac{\pi}{4} \cdot (d_n^2 - d_{вн}^2) \cdot l = \frac{\pi}{4} \cdot (16^2 - 13,6^2) \cdot 1 = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

$$m_{тр} = 8110 \cdot 5,6 \cdot 10^{-5} = 0,452 \text{ кг}.$$

Масса трубного пучка из сплава:

$$M_{тр.п.} = m_{тр} \cdot L_{тр} = 0,452 \cdot 130061 = 58,9 \text{ т}.$$

Стоимость пучка труб:

$$C_{тр.п.} = M_{тр.п.} \cdot C_{сплав} = 58,9 \cdot 10^3 \cdot 230 = 13,54 \text{ млн.рублей}.$$

Необходимо учесть дополнительную обработку труб (прошивка слитка, прокат труб). Расходы на дополнительную обработку равны 15-ти процентам от основной стоимости трубного пучка.

$$C_{обр} = C_{тр.п.} \cdot 0,15 = 13,5 \cdot 10^6 \cdot 0,15 = 2,03 \text{ млн.рублей}.$$

Масса демонтируемых ТОТ такая же.

Стоимость лома нержавеющей стали  $C_{лом.сталь} = 60$  руб / кг.

Полная стоимость лома нержавеющей стали:

$$C_{лом} = M_{тр.п.} \cdot C_{лом.сталь} = 58,9 \cdot 10^3 \cdot 60 = 3,53 \text{ млн.рублей}$$

Тогда полная стоимость теплообменных труб:

$$C_n = C_{тр.п.} + C_{обр} - C_{лом} = 13,5 + 2,03 - 3,53 = 12,04 \text{ млн.рублей}.$$

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61



### 3.2. Расчет численности рабочих по категориям

Произведем расчет основных рабочих участвующих в замене ТОТ:

$$P_{расч}^{осн} = \frac{T_{\partial}}{F_{\partial p}},$$

где  $T_{\partial}$  - трудоемкость выполняемой работы;

$F_{\partial p}$  - действующий фонд рабочего времени одного работающего.

$$P_{расч}^{осн} = \frac{2880 \text{ чел / час}}{240 \text{ час}} = 12 \text{ чел.}$$

Списочная численность:

$$P_{сн}^{осн} = P_{расч}^{осн} \cdot k = 12 \cdot 1,1 = 13 \text{ чел.}$$

где  $k = 1,1$  - коэффициент, учитывающий не выходы на работу по уважительной причине.

Кроме основных рабочих, непосредственно принимают участие в модернизации вспомогательные рабочие и персонал станции.

Численность вспомогательных рабочих определяется, укрупнено в размере 28-32% от численности основных рабочих:

$$P_{сн}^{всп} = P_{расч}^{осн} \cdot 30\% = 12 \cdot 0,3 = 3 \text{ чел.}$$

Численность инженерно-технических работников и служащих укрупнено, может быть определено в размере 8-12% от численности всех рабочих (основных и вспомогательных):

$$P_{сн}^{инт} = (P_{расч}^{осн} + P_{сн}^{всп}) \cdot 8\% = (13 + 3) \cdot 0,08 = 1 \text{ чел.}$$

Общая численность работающих на замене ТОТ:

$$P_{об} = P_{сн}^{осн} + P_{сн}^{всп} + P_{сн}^{инт} = 13 + 3 + 1 = 17 \text{ чел.}$$

### 3.3. Расчет фонда заработной платы

Основная заработная плата производственных рабочих отражает заработную плату рабочих и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в модернизации:

$$ЗП_{осн} = ЗП_{ср.мес} \cdot P_{об} \cdot 3мес = 25000 \cdot 17 \cdot 3 = 1,275 \text{ млн.рублей,}$$

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

где  $ЗП_{ср.мес}$  - средняя месячная заработанная плата одного производственного работающего.

К дополнительной заработной плате относятся оплата очередных и дополнительных отпусков, компенсации за неиспользуемый отпуск, оплата перерывов в работе кормящих матерей, оплата за время, использованное работником на выполнение государственных и общественных обязанностей, и другие выплаты, предусмотренные трудовым законодательством, за не проработанное на производстве время.

Дополнительная заработная плата укрупнено берется 9% от основной заработной платы:

$$ЗП_{доп} = ЗП_{осн} \cdot 9\% = 1,275 \cdot 10^6 \cdot 0,09 = 114750 \text{ рублей.}$$

В случае превышения заработной платы работников над нормативной, для последующих расчетов берется нормативная заработная плата с пересчетом превышения.

Отчисления на социальные нужды начисляются с основной и дополнительной заработной платы:

$$ЗП_{отч} = (ЗП_{осн} + ЗП_{доп}) \cdot 31,7\% = (1,275 \cdot 10^6 + 114750) \cdot 0,317 = 440551 \text{ рублей.}$$

где 31,7% - коэффициент, учитывающий отчисления:

в пенсионный фонд - 22%;

в соцстрах - 2,9%;

в медицинское страхование - 5,1%;

отчисление от несчастного случая - 1,7% (АЭС).

Зная стоимость ТОТ и стоимость работ по замене ТОТ, рассчитаем капиталовложения на данную модернизацию:

$$K = C_n + ЗП_{осн} + ЗП_{доп} + ЗП_{отч} = \\ = 12,04 \cdot 10^6 + 1,275 \cdot 10^6 + 114750 + 440551 = 13,9 \text{ млн. рублей.}$$

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

### 3.4. Определение расхода ядерного топлива

Качество пара значительно влияет на относительный внутренний КПД ступеней турбины и, соответственно, на относительный внутренний КПД всей турбины. В связи с уменьшением влажности пара на входе в турбину, относительный внутренний КПД турбины увеличивается.

Относительный внутренний КПД турбины К-1000-60/1500  $\eta_{oi1} = 0,825$ .

Относительный внутренний КПД турбины при замене ГОТ  $\eta_{oi2} = 0,826$ .

КПД по отпуску электроэнергии для энергоблока типа ВВЭР составляет около 33%.

$$\eta_{э1} = \eta \cdot \eta_{oi1};$$

$$\eta \cdot 0,825 = 0,33; \rightarrow \eta = 0,4.$$

КПД по отпуску электроэнергии при улучшении качества пара увеличивается:

$$\eta_{э2} = 0,4 \cdot 0,826 = 0,3304.$$

Годовой расход ядерного горючего:

$$B_{год} = \frac{Q_p \cdot 365 \cdot K_y}{\bar{B}},$$

где:  $Q_p$  - тепловая мощность реактора, МВт.

$K_y = \frac{h_y}{8670}$  - коэффициент использования установленной мощности АЭС.

$h_y$  - число часов установленной мощности (для АЭС принимается равным 6000-7000 часов в год).

$\bar{B}$  - средняя глубина выгорания ядерного горючего, МВт·сут/т.

Для реактора типа ВВЭР-1000 примем:

$$\bar{B} = 43000 \frac{МВт \cdot сут}{т}.$$

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

Для блока при нормальном качестве генерируемого пара:

$$B_{год}^{ст} = \frac{\frac{3000}{0,33} \cdot 365 \cdot \frac{6500}{8670}}{43000} = 57,85 \text{ т.}$$

При улучшенном качестве пара:

$$B_{год}^{ул} = \frac{\frac{3000}{0,3304} \cdot 365 \cdot \frac{6500}{8670}}{43000} = 57,78 \text{ т.}$$

При улучшении качества пара увеличивается экономичность блока по производству электроэнергии и уменьшается расход топлива.

### 3.5. Оценка стоимости ядерного топлива, издержек на топливо и экономии на топливо.

Для вычисления годовых издержек необходимо оценить стоимость горючего для реактора ВВЭР с учетом его транспортировки и др.

Затраты АТЭЦ на ядерное топливо принято рассчитывать исходя из установленной цены ТВС со свежим топливом, поставляемых на АЭС, без учета стоимости урана и плутония, накопленного в отработанном топливе и расходов по химической переработке отработанного топлива.

Удельная стоимость ядерного топлива за период кампании с однородной топливной загрузкой:

$$\begin{aligned} \bar{C}_m &= \bar{C}_U + \bar{C}_{об.У} + \bar{C}_{изг.} + \bar{C}_{транс} = \\ &= 90 + 700 + 160 + 3 = 953 \text{ дол / кг} = 57180 \text{ рублей / кг.} \end{aligned}$$

где  $\bar{C}_U$  - удельная стоимость исходного продукта (природного урана);

$\bar{C}_{об.У}$  - удельная стоимость обогащенного урана;

$\bar{C}_{изг.}$  - удельная стоимость изготовления ТВС, включая стоимость КМ;

$\bar{C}_{транс}$  - удельная стоимость транспортировки ТВС к АЭС.

Издержки на ядерное горючее для АЭС с реакторами на тепловых нейтронах можно представить в виде (без учета стоимости отработанного топлива):

$$I_m = \bar{C}_m \cdot B_{год}.$$

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

Вычислим годовые издержки на топливо для обоих вариантов:

$$I_{m1} = 953 \cdot 57,85 \cdot 10^3 = 55,13 \text{ млн.долл.};$$

$$I_{m2} = 953 \cdot 57,78 \cdot 10^3 = 55,07 \text{ млн.долл.}$$

Экономия издержек на топливо в год:

$$\Delta I_m = I_{m1} - I_{m2} = (55,13 - 55,07) \cdot 10^6 = 0,7 \text{ млн.дол} = 4 \text{ млн.рублей.}$$

### 3.6. Расчет экономического эффекта модернизации

Для оценки экономической эффективности инвестиций в энергетические объекты необходимо учитывать фактор времени. Под последним понимается учет разновременности осуществления инвестиций, производственных издержек и получения прибыли.

В качестве критериев экономической эффективности инвестиций наибольшее распространение получили чистый приведенный доход, индекс рентабельности проекта, срок окупаемости и внутренняя норма доходности проекта.

Как определили выше, капиталовложения на замену ТООТ:

$$K = 13,9 \text{ млн.рублей.}$$

Чистый приведенный доход (*NPV*).

В соответствии с этим критерием лучшим проектом будет тот, который обеспечивает большие значения ЧПД:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{D_t}{(1+r)^t},$$

где  $D_t = Pr_t - K_t$  - чистый доход в  $t$ -ом году существования проекта;

$Pr_t$ ,  $K_t$  - соответственно чистая прибыль и инвестиции в  $t$ -ом году;

$r$  - ставка дисконтирования.

При модернизации действующего объекта энергетики  $r = 0,15$ .

Предположим, что блок проработал 10 лет. Тогда оставшееся время работы блока - 20 лет.

Принимаем, что капиталовложения в модернизацию единовременны.

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

$$NPV = \sum_{t=1}^{20} \frac{D_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^{20} \frac{\Delta I_m}{(1+0,15)^t} - K = \sum_{t=1}^{20} \frac{4}{(1+0,15)^t} - 13,9 = 11,2 \text{ млн.рублей.}$$

Значение ЧПД положительно, что означает, что в результате реализации проекта будет получен доход с учетом фактора временного обесценивания денег.

Срок окупаемости инвестиций ( $T_{ок}$ ).

Срок окупаемости инвестиций с учетом фактора времени может быть найден путем решения следующего уравнения относительно  $T_{ок}$ :

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_{ок}} \frac{D_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^{T_{ок}} \frac{I_m}{(1+0,15)^t} - K = 0;$$

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_{ок}} \frac{4}{(1+0,15)^t} - 13,9 = 0.$$

Решая уравнение получаем:

$$T_{ок} = 5 \text{ лет.}$$

Срок окупаемости проекта получился относительно малым для объектов энергетики.

Индекс рентабельности проекта ( $PI$ ).

Индекс рентабельности инвестиционного привлекательного проекта должен быть больше единицы:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{D_t}{(1+r)^t}}{K} = \frac{\sum_{t=1}^{20} \frac{4}{(1+0,15)^t}}{13,9} = 1,8;$$

Учитывая малое время окупаемости, индекс рентабельности получился больше единицы. Как следствие можно сделать вывод о рентабельности проекта.

Определим экономический эффект от замены ТОТ. В общем случае:

$$\mathcal{E} = Z_B - Z_H,$$

где  $Z_B$ ,  $Z_H$  - приведенные затраты на старую и новую технику.

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

Приведенные затраты на старую технику равны ежегодным эксплуатационным издержкам для базовой техники  $Z_B = I_B$ .

Приведенные затраты на новую технику:

$$Z_H = K \cdot r + I_H,$$

где  $I_H$  - ежегодные эксплуатационные издержки для новой техники.

Эксплуатационные издержки для стандартных ТОТ больше эксплуатационных издержек новых ТОТ на величину стоимости сэкономленного топлива:

$$I_B = I_H + \Delta I_m.$$

Таким образом:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = Z_B - Z_H &= (I_H + \Delta I_m) - (K \cdot r + I_H) = \Delta I_m - K \cdot r = \\ &= 4 - 13,9 \cdot 0,15 = 1,9 \text{ млн.рублей.} \end{aligned}$$

Таблица 1 - Калькуляция на замену ТОТ

Наименование статей	Размерность	Показатели
Сырье и основные материалы	млн.руб	13,54
Обработка материалов	млн.руб	2,03
Остаточная стоимость	млн.руб	3,53
Итоговая стоимость ТОТ	млн.руб	12,04
Основная зарплата	млн.руб	1,275
Дополнительная зарплата	руб	114750
Отчисления на социальные нужды	руб	440551
Капиталовложения	млн.руб	13,9
Экономия издержек на топливо	млн.руб/год	4
Чистый приведенный доход	млн.руб	11,2
Срок окупаемости проекта	год	5
Индекс рентабельности проекта	-	1,8
Годовой экономический эффект	млн.руб/год	1,9

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Савина К. И., Кель В. А., Лавриненко С. В. Компьютерное моделирование теплогидравлического процесса в теплообменном оборудовании // Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодёжного форума, 28 сентября - 2 октября 2015 г., г. Томск 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2015. — Т. 2. — С. 71-75.

2. Savina, K., Abramovskih, A., Naymin, V., Lavrinenko, S. Modeling of Thermohydraulic Processes of Heat Exchange Equipment (2016) MATEC Web of Conferences, 72, art. no. 01042, DOI: 10.1051/matecconf/20167201042

3. Савина К.И. , Буквич Д.И. Перспектива применения высоконикелевого сплава ЧС-33 для горизонтального парогенератора (ПГ-1000М). // Интеллектуальные энергосистемы: труды IV Международного молодёжного форума, 2016 г., г. Томск 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2015. — Т. 1. — С. 329-330.

					ФЮРА.693410.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		100