

**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

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЗ ВВЭР-1200</b>

УДК 621.311.25:621.039.52.001.24

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>5011</b>	<b>ВИНОГРАДОВ Максим Петрович</b>		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>доцент кафедры АТЭС</b>	<b>А.В. Кузьмин</b>	<b>к.т.н., доцент</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 технологических процессов</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>	<b>-</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 языке, 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 способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни, непрерывному самосовершенствованию, развитию социальных и профессиональных компетенций, использовать	Требования ФГОС (ОК-7 ПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
	полученные знания для обучения и воспитания новых кадров	международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
P11	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>
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 и</i> 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>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
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	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>
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>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
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 (пп. 2.2, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
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 подготовки **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:

**Дипломная работа**

(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
<b>5011</b>	<b>Виноградову Максиму Петровичу</b>

Тема работы:

**Расчет эффективности СУЗ ВВЭР-1200**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

**11.11.2016г. 9734/с**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**20 января 2017 года**

**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 оценка эффективности СУЗ и её влияние на гидродинамические характеристики активной зоны</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. Конструкция ПС СУЗ</li><li>2. Режимы работы СУЗ</li><li>3. Нейтронно-физические характеристики реактора</li><li>4. Эффективности стержней СУЗ</li><li>5. Гидравлический потери в направляющих каналах СУЗ</li></ol>

<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Чертеж конструкции СУЗ – 1л. формата А1 2. Чертеж функциональной схемы КД – 1л. формата А1
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
<b>Финансовый менеджмент</b>	<b>Сергейчик С.И., доцент кафедры менеджмента</b>
<b>Социальная ответственность</b>	<b>Амелькович Ю.А., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности</b>
<b>Автоматизация технологических процессов</b>	<b>Андык В.С., доцент кафедры автоматизации технологических процессов</b>
<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>	<b>10 июня 2016 года</b>
---	--------------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Кузьмин А.В.	к.т.н.		<b>10.06.16</b>

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5011	Виноградов Максим Петрович		<b>10.06.16</b>

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5011	Виноградову Максиму Петровичу

<b>Институт</b>	<b>Энергетический</b>	<b>Кафедра</b>	<b>АТЭС</b>
Уровень образования	Специалист	Направление/специальность	14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. Эксплуатационные издержки энергоблока ВВЭР работающего по годовому топливному циклу
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	2. Расходование ресурсов согласно годовому топливному циклу
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	3. Единый социальный налог (ЕСН) 30%, ставка дисконтирования 10%

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности перехода на более длинный восемнадцатимесячный топливный цикл
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	2. Расчет капитальных затрат нового энергоблока с удлиненным топливным циклом
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	3. Расчет чистого приведенного дохода и чистого дисконтируемого дохода проекта энергоблока с удлиненным топливным циклом

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

1. График чистого приведенного дохода проекта
2. График чистого дисконтируемого дохода проекта

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	10.10.16
---	----------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент кафедры менеджмента.	Сергейчик С.И.	к.т.н., доцент		10.10.16

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5011	Виноградов М.П.		10.10.16

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5011	Виноградову Максиму Петровичу

<b>Институт</b>	<b>Энергетический</b>	<b>Кафедра</b>	<b>АТЭС</b>
Уровень образования	Специалист	Направление/специальность	14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения

*Реакторный цех, рабочее место оператора реакторного отделения*

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

**1. Производственная безопасность**

1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;
- действие фактора на организм человека;
- приведение допустимых норм с необходимой размерностью;
- средства защиты.

1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- механические опасности;
- термические опасности;

**2. Экологическая безопасность:**

- анализ воздействия газоаэрозольных выбросов реактора на атмосферу;
- анализ воздействия жидких сбросов реактора на гидросферу;
- анализ воздействия твердых радиоактивных отходов реактора на литосферу.

<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации реактора;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	10.10.16
---	----------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Амелькович Ю.А.	к.т.н., доцент		10.10.16

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5011	Виноградов Максим Петрович		10.10.16

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 137 страниц, 29 рисунков, 17 таблиц, 4 приложений, 29 источников, 2 листов графического материала.

Ключевые слова: органы регулирования, система управления и защиты, поглощающие стержни, ВВЭР-1200, реактивность.

Объектом исследования являются: СУЗ ВВЭР-1200

Цель работы – оценка эффективности органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ).

В процессе работы выполнены нейтронно-физический и теплогидравлический расчеты активной зоны и направляющих каналов поглощающих элементов.

В результате работы получены значения эффективностей ОР СУЗ, по методу коэффициентов относительного энерговыделения в тепловыделяющих сборках (ТВС). Определены гидравлические потери в направляющих каналах и относительный расход теплоносителя на охлаждение поглощающих элементов. Выполнен анализ погрешностей расчета.

Методика расчета может быть использована для грубой оценки эффективности СУЗ, на начальных стадиях проектирования энергоблока.

Инва. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инва. № дубл.	Подпись и дата
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

## СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

- АЗ – активная зона;
- БР – реактор на быстрых нейтронах;
- БЭ – боковой экран;
- БВ – бассейн выдержки;
- ВП – выгорающий поглотитель;
- ЗБО – зона большого обогащения;
- ЗСО – зона среднего обогащения;
- ЗМО – зона малого обогащения;
- КГО – контроль герметичности оболочек ТВЭЛ;
- МП – механизм перегрузки;
- ПС – поглощающий стержень;
- СУЗ – система управления и защиты;
- СОДС - система обнаружения дефектных сборок;
- ТВС – тепловыделяющая сборка;
- ТЭ – торцевой экран;
- ТВС – тепловыделяющая сборка;
- ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;
- НУЭ – нормальные условия эксплуатации;
- ННУЭ – нарушение нормальных условий эксплуатации;
- ЭБ – энергоблок;
- ЯТ – ядерное топливо;
- ЦПС – центральный поглощающий стержень;

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Реферат .....	12
Список принятых обозначений и сокращений.....	13
Оглавление .....	14
Введение.....	17
1. Проектные основы поглощающих стержней СУЗ .....	18
1.1. Назначение и функции .....	18
1.2. Проектные требования к СУЗ.....	18
1.3. Описание конструкции.....	19
1.4. Режимы работы СУЗ в течении кампании и в аварийных режимах.....	20
1.4.1. Изменение мощности энергоблока .....	20
1.4.2. Ложное срабатывание аварийной защиты .....	23
1.4.3. Ложное срабатывание ускоренной предупредительной защиты.....	24
1.4.4. Падение органов системы управления и защиты (единичное) .....	24
2. Нейтронно-физический расчет реактора ВВЭР-1200 .....	26
2.1. Описания ядерно-физического проекта .....	26
2.2. Определение объемных долей компонентов по зонам элементарной ячейки .....	30
2.3. Определение ядерной или молекулярной плотности компонентов реактора в среднем по ячейке и по зонам.....	32
2.4. Определение средней по ячейке температуры нейтронного газа .....	34
2.5. Определение энергии сшивки.....	35
2.6. Определение макроскопических сечений по блоку и замедлителю .....	38
2.7. Расчет коэффициента размножения для бесконечной активной зоны....	39
2.7.1. Число вторичных нейтронов.....	40
2.7.2. Коэффициент размножения на быстрых нейтронах .....	40
2.7.3. Вероятность избежать резонансного захвата.....	45
2.7.4. Коэффициент использования тепловых нейтронов .....	46
3. Расчет эффективности стержней СУЗ.....	47

Изн. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

3.1.	Эффективный радиус поглощающего стержня .....	47
3.2.	Расчет коэффициента размножения для активной зоны с ЦПС .....	47
3.3.	Эффективность регулирующих стержней.....	51
4.	Гидравлический расчет активной зоны реактора.....	60
4.1.	Гидравлический расчет направляющего канала ПЭЛ .....	60
5.	Система автоматического регулирования компенсатора давления .....	76
5.1.	Введение.....	76
5.2.	Краткое описание технологии работы оборудования.....	76
5.3.	Схема автоматического регулирования.....	77
5.4.	Обзор существующей аппаратуры регулирования и выбор аппаратуры	79
	Заключение .....	80
6.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	81
6.1.	Эксплуатационные издержки для серийного реактора.....	81
6.2.	Эксплуатационные издержки энергоблока 3 Ростовской АЭС .....	86
6.3.	Экономический эффект .....	88
6.4.	Оценка прибыли и рентабельности энергоблоков АЭС .....	90
6.5.	Оценка экономической эффективности инвестиций .....	91
7.	Социальная ответственность .....	94
7.1.	Вредные производственные факторы.....	94
7.1.1.	Ионизирующее излучение.....	94
7.1.2.	Электромагнитное излучение .....	98
7.1.3.	Микроклимат .....	99
7.1.4.	Освещение .....	100
7.1.5.	Шумы и вибрации .....	101
7.2.	Анализ выявленных опасных производственных факторов .....	103
7.2.1.	Электробезопасность .....	103
7.2.2.	Пожарная безопасность.....	106
7.2.3.	Термические опасности.....	108
	Заключение .....	109

Инов. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

Список использованных источников .....	111
Приложение А .....	114
Приложение Б .....	120
Приложение В.....	122
Приложение Г .....	126
Графические материалы:	
ФЮРА.693100.002 Система управления и защиты	
ФЮРА. 693100.003 С2 Функциональная схема автоматизации компенсатора давления	

Инва. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инва. № дубл.	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы реактора происходит выгорание исходного и накопление нового ядерного топлива, накопление продуктов деления и радиационного захвата нейтронов ядерным топливом. Все это в конечном итоге приводит к медленному, но непрерывному изменению реактивности. В реакторах на тепловых нейтронах коэффициент воспроизводства обычно меньше единицы, а накопление продуктов деления и радиационного захвата приводит к отравлению и шлакованию. Таким образом, реактивность этих реакторов в процессе работы уменьшается. В связи с этим в условиях периодических перегрузок ядерного топлива, которые практически и реализуются в современных ядерных энергетических реакторах, необходимо после каждой частичной перегрузки загрузить избыток топлива над критической массой, а действие избытка вплоть до очередной частичной перегрузки скомпенсировать компенсирующими органами.

Реактивность реактора изменяется, кроме того, в связи с мощностным и температурным эффектами. Переход с одного уровня мощности на другой сам по себе требует изменения реактивности, осуществляемого регулируемыми органами. Изменение реактивности в переходных режимах происходит сравнительно быстро. Это обусловило специфические требования к органам регулирования по сравнению с органами, компенсирующими медленное изменение реактивности.

Несмотря на большое разнообразие регулирующих органов, используемых в ядерных реакторах, подавляющее большинство из них основано на поглощении избыточных нейтронов. В данной дипломной работе будем рассматривать подвижные поглощающие стержни, используемые практически во всех реакторах.

Инь. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инь. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

# 1. ПРОЕКТНЫЕ ОСНОВЫ ПОГЛОЩАЮЩИХ СТЕРЖНЕЙ СУЗ

## 1.1. Назначение и функции

Рабочим органом СУЗ (РО СУЗ) является поглощающий стержень системы управления и защиты (ПС СУЗ), сцепленный со штангой привода СУЗ. РО СУЗ предназначен для быстрого прекращения ядерной реакции в активной зоне, поддержания мощности реактора на заданном уровне и ее перевода с одного уровня на другой, выравнивания поля энерговыделения по высоте активной зоны, предупреждения и подавления ксеноновых колебаний.

Проект реакторной установки и активной зоны предусматривает установку до 121 РО СУЗ в не периферийных ячейках реактора.

## 1.2. Проектные требования к СУЗ

Основой проектирования РО СУЗ являются следующие требования [1]:

– скорость введения реактивности при извлечении регулирующих групп РО СУЗ с рабочей скоростью не должна превышать  $0,07 \cdot \beta_{\text{эфф}}/\text{с}$ , где  $\beta_{\text{эфф}}$  - эффективная доля запаздывающих нейтронов;

– эффективность РО СУЗ должна быть в определенных пределах, чтобы, с одной стороны, в аварии с выбросом РО СУЗ увеличение мощности не приводило к превышению проектных пределов повреждения твэлов, а, с другой стороны, в режимах аварийного останова должен обеспечиваться перевод реактора в подкритическое состояние с номинального уровня и поддержание подкритичности в проектных аварийных режимах с разуплотнениями второго контура без нарушения проектных пределов повреждения твэлов;

– при непредусмотренном перемещении наиболее эффективных одного или группы РО СУЗ не должно приводить к нарушению пределов безопасной эксплуатации по повреждениям твэлов с учетом срабатывания аварийной защиты без одного наиболее эффективного РО СУЗ;

– характеристики РО СУЗ должны обеспечивать ввод отрицательной реактивности на любом участке их движения при введении в активную зону в любой комбинации их расположения в проектных режимах;

Инов. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ	18

- время падения РО СУЗ, принимаемое для анализов безопасности, не должно превышать 4,0 с, а принимаемое в анализах прочности не должно быть меньше 1,2 с;
- функции аварийной защиты реактора должны выполняться с учетом застревания в крайнем верхнем положении одного наиболее эффективного РО СУЗ;
- длина поглотителя РО СУЗ должна быть не менее высоты топливного столба ТВС и обеспечивать после срабатывания аварийной защиты его перекрытие поглотителем.

### 1.3. Описание конструкции

РО СУЗ состоит из ПС СУЗ, сцепленного со штангой привода СУЗ.

ПС СУЗ (Рисунок А.1) состоит из: элементов поглощающих (ПЭЛов), головки, пружин и гаек. Основные геометрические характеристики ПС СУЗ представлены в таблице А.1. [2].

ПЭЛ (Рисунок А.2) представляет собой оболочку загерметизированную посредством сварки с обоих концов концевыми деталями: снизу - конусом, сверху - наконечником.

Внутренний объем оболочки заполнен поглощающим материалом.

В качестве поглощающего материала используются виброуплотненные порошки карбида бора ( $B_4C$ ) и титаната диспрозия ( $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$ ), причем порошок титаната диспрозия размещен в нижней части ПЭЛа.

Фиксация столба поглощающего материала от перемещений осуществляется посредством пробок, изготовленных из никелевой сетки.

Наконечник ПЭЛа посредством сварки соединен с утяжелителем, применяемым для придания ПЭЛу необходимой массы.

В качестве оболочки применяется труба из сплава марки 42ХНМ.

Головка ПС СУЗ представляет собой втулку с консольными ребрами, в которых выполнены отверстия для наконечников ПЭЛов.

Инь. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инь. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ	19

Втулка головки ПС СУЗ имеет два выступа для зацепления со штангой привода СУЗ и отверстие под фиксирующий штырь для исключения несанкционированного разворота штанги относительно головки ПС СУЗ и расцепления штанги привода с ПС СУЗ.

Пружины установлены на наконечниках ПЭЛов по обе стороны от ребер головки ПС СУЗ и предназначены для демпфирования ПЭЛов во время удара ПС СУЗ об элементы головки кассеты при срабатывании аварийной защиты, а также при перемещениях ПС СУЗ в процессе регулирования мощности реактора.

Над верхними пружинами установлены гайки, которые фиксируются от самопроизвольного отворачивания при помощи сварки.

Конструкция НК ТВС (Рисунок А.3), в котором в процессе эксплуатации перемещается ПС СУЗ состоит из трубы, наконечника и цанги головки.

Расположение стержней относительно активной зоны (Рисунок А.4.).

Распределение РО СУЗ по группам (Рисунок А.5.). ОР СУЗ разбиты на 12 групп. В качестве рабочих групп РО СУЗ выбраны группы под номерами 9-12. Общая длина поглощающей части РО СУЗ составляет 3800 мм (с учетом наконечника), и при максимально-возможном погружении РО СУЗ в активную зону обеспечивает полное перекрытие топливного столба.

Критерием работоспособности РО СУЗ являются:

- время срабатывания аварийной защиты не более 4 с и не менее 1,2 с;
- усилие трения при перемещении РО СУЗ с верхнего блока, определяемое при сборке реактора, не более 98 Н (10 кгс);
- отсутствие пластических деформаций ребер головки ПС СУЗ.

#### **1.4. Режимы работы СУЗ в течении кампании и в аварийных режимах**

##### **1.4.1. Изменение мощности энергоблока**

Поддержание и изменение мощности реактора и турбогенератора в соответствии с требованиями энергосистемы осуществляется на допустимом для

Инь. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инь. № дубл.	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ	20

реактора уровне мощности с помощью АРМ, работающего совместно с системой управления турбины.

АРМ предназначен для приведения мощности реактора в соответствие мощности турбогенератора при одновременном поддержании заданного значения давления пара, для поддержания заданного значения нейтронной мощности реактора и ограничения увеличения давления пара. АРМ реактора формирует управляющие команды в СГИУ на перемещение рабочей группы ОР СУЗ в следующих режимах:

- режим поддержания заданного значения нейтронного потока (режим «Н») в диапазоне от 3 % до 100 %  $N_{НОМ}$ ;
- режим поддержания заданного давления пара в ГПК (режим «Т») в диапазоне от 20 % до 102 %  $N_{НОМ}$ ;
- стерегущий режим (режим «С»).

В режиме «С» АРМ выдает команду на перемещение ОР СУЗ вниз при превышении давлением пара в ГПК от номинального на 0,19 МПа.

При работе АРМ в режимах «Н» или «С» система управления турбиной поддерживает заданное значение давления пара.

Выбор режима работы АРМ должен осуществляться оперативным персоналом, кроме того, автоматически должен осуществляться:

переход из режима «Т» в режим «Н» при превышении заданного значения уставки нейтронной мощности со снижением мощности до заданного значения или без снижения мощности после снятия сигналов УПЗ и ПЗ-I (в том числе РОМ), а также после прекращения движения приводов СУЗ по командам дистанционного управления;

переход из режима «Н» в режим «Т» при превышении номинального давления в ГПК на 0,25 МПа.

Допускается производить поддержание и изменение мощности с помощью дистанционного управления в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

Интв. № подл.	Подпись и дата
Взам. интв. №	Интв. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

При переводе РУ на пониженный уровень мощности необходимо своевременно переключать уставки АЗ.

При изменении мощности реактора необходимо удерживать регулируемую группу ОР СУЗ в положении, обеспечивающем оптимальное поле энерговыделения, корректировкой концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура.

Для оборудования и трубопроводов РУ В-491 представлены основные проектные режимы изменения мощности:

- изменение мощности энергоблока не менее + 2 %  $N_{НОМ}$  и не более +5 %  $N_{НОМ}$  со скоростью 1 %  $N_{НОМ}/с$  (режим первичного регулирования - поддержания частоты в сети);
- изменение мощности энергоблока со скоростью не менее 1 %  $N_{НОМ}/мин$  и не более 5 %  $N_{НОМ}/мин$  при отклонении от текущего значения не более +10 %  $N_{НОМ}$  (режим вторичного регулирования);

При работе в режиме первичного регулирования предусматриваются возможные изменения мощности энергоблока до 5 %  $N_{НОМ}$  со скоростью 1 %  $N_{НОМ}/с$ . Перед переводом энергоблока в режим первичного регулирования мощность снижается до 95 % от номинальной. АРМ переключается в режим «Т», ЭГСР - в режим «РЧ». При снижении частоты тока в сети ЭГСР воздействием на регулирующие клапаны турбины увеличивает отбор пара от ПГ, что приводит к снижению давления во втором контуре.

Снижение давления во втором контуре приводит, в свою очередь, к снижению температуры на входе в реактор, которое за счет реактивных обратных связей увеличивает мощность реактора и, соответственно, мощность энергоблока. Увеличение частоты тока в сети приводит к противоположным явлениям. Изменение давления второго контура на 0,5 МПа приводит к соответствующему изменению мощности реактора примерно на 5 %  $N_{НОМ}$ . Использование реактивных обратных связей обеспечивает в данном режиме изменение мощности без движения ОР СУЗ.

Инь. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инь. № дубл.
Подпись и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ	22

При работе в режиме вторичного регулирования предусматриваются возможные изменения мощности энергоблока до 10 %  $N_{НОМ}$  со скоростью до 5 %  $N_{НОМ}/МИН$  для обеспечения перевода энергоблоков энергосистемы, работающих в режиме первичного регулирования, в исходное состояние. Перед переводом энергоблока в режим вторичного регулирования мощность снижается до 90 % от номинальной. После быстрого реагирования на изменение частоты в сети энергоблоки, работающие в режиме первичного регулирования, должны быть переведены на исходный уровень мощности. Энергоблок, работающий в режиме вторичного регулирования принимает или отдает эту нагрузку по сигналу от диспетчера энергосети. Для экономии ресурса приводов ОР СУЗ и уменьшения количества жидких радиоактивных отходов при реализации данного режима изменение мощности реактора может быть частично реализовано с использованием реактивных обратных связей путем изменения параметров второго контура. Кроме того, снижение давления в ГПК в исходном состоянии до 6,5 МПа может позволить реализовать изменение мощности до 10 %  $N_{НОМ}$  без движения ОР СУЗ.

#### 1.4.2. Ложное срабатывание аварийной защиты

При срабатывании АЗ происходит падение всех ОР СУЗ, блокируются сигналы АРМ. Происходит снижение тепловой мощности реактора до уровня остаточных тепловыделений. До момента закрытия стопорных клапанов турбины снижаются: давление первого контура, температура в «горячих нитках» первого контура и уровень в КД. Во втором контуре до момента закрытия стопорных клапанов турбины снижается уровень в ПГ за счет снижения объемного паросодержания и затем восстанавливается подачей воды питательными насосами. По факту срабатывания АЗ закрываются стопорные клапаны турбины и повышается давление второго контура до уставки открытия БРУ-К, которые переходят в режим поддержания давления в ГПК. Температура питательной воды снижается до ~ 164°C. Циркуляция теплоносителя первого контура обеспечивается работой ГЦНА. Давление в первом контуре и уровень в

Ив. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Ив. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

КД поддерживаются в соответствии с программой работы соответствующих регуляторов.

После окончания переходного процесса параметры РУ стабилизируются на значениях, близких к параметрам «горячего» состояния. До выяснения причин ложного срабатывания АЗ реактор переводится в режим «горячее» состояние (создается необходимая концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура).

### 1.4.3. Ложное срабатывание ускоренной предупредительной защиты

По факту формирования сигнала УПЗ все выходные сигналы АРМ блокируются, происходит сброс отдельно выбранной группы или комбинации органов регулирования одной группы ОР СУЗ. Вводится отрицательная реактивность, тепловая мощность реактора снижается до  $\sim (50 - 60) \% N_{НОМ}$  в зависимости от эффективности УПЗ. АРМ включается в режим «Н» на поддержание текущей мощности реактора, регулятор турбины при этом переключается в режим поддержания постоянного давления перед стопорными клапанами и разгружает турбину.

Оперативный персонал после выяснения причин ложного срабатывания УПЗ принимает решение о дальнейшей работе.

### 1.4.4. Падение органов системы управления и защиты (единичное)

Исходное состояние РУ - стационарный режим работы на номинальной мощности.

По факту единичного падения ОР СУЗ срабатывает соответствующий нижний концевой выключатель и формируется сигнал ПЗ-2 (запрет на извлечение ОР СУЗ из активной зоны). Вводится отрицательная реактивность, тепловая мощность реактора кратковременно снижается (на  $\sim 15 \%$  от номинальной мощности в зависимости от эффективности в данный период кампании). Падение ОР СУЗ может привести к неравномерности распределения

Инь. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инь. № дубл.	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ	24

энерговыделения, что в свою очередь может приводить к повышению мощности отдельных ТВС.

Поскольку мощность реактора становится меньше мощности турбогенератора (при наличии сигнала ПЗ-2 АРМ не формирует команду на увеличение мощности реактора), давление во втором контуре уменьшается, что приводит к дальнейшему увеличению мощности реактора за счет температурных эффектов реактивности (до ~ 100 % от номинальной мощности в зависимости от эффективности в данный период кампании).

Далее оперативный персонал должен снизить мощность реактора до 80 % от номинальной и выполнить действия по устранению дефекта и подъему упавшего ОР СУЗ, после чего увеличить мощность реактора до номинальной.

Инов. № подл.	Подпись и дата		Инов. № дубл.	Подпись и дата		
	Взам. инв. №					
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ	25

## 2. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Оценка экономического эффекта при переходе на удлиненный восемнадцатимесячный топливный цикл.

В настоящее время в соответствии с «Программой увеличения выработки электроэнергии на действующих энергоблоках АЭС концерна «Росэнергоатом» на 2007 – 2015 годы» № ПРГ-609М07 на российских АЭС с реакторами ВВЭР-1000 выполняются работы по повышению коэффициента использования установленной мощности энергоблоков АЭС. Для достижения указанной цели осуществляется перевод энергоблоков в 18-месячный цикл с одновременным повышением тепловой мощности реактора до 104 % номинальной.

Сравнивать будем реакторную установку третьего энергоблока Ростовской АЭС, работающей по 18 месячному топливному циклу на увеличенной мощности 3120МВт с серийными реакторами ВВЭР-1000 с 12 месячным топливным циклом на тепловой мощности 3000 МВт.

### 2.1. Эксплуатационные издержки для серийного реактора

Первоначальный расчет себестоимости электроэнергии выполнен для серийного образца реактора ВВЭР-1000.

$$S_{AЭС} = \frac{I_{AЭС}}{\mathcal{E}_{omn}},$$

где  $\mathcal{E}_{omn}$  – отпущенная потребителю электроэнергия за год;  $I_{AЭС}$  – эксплуатационные издержки.

Ежегодные эксплуатационные издержки:

$$I_{AЭС} = I_T + I_A + I_{ЗП} + I_{ТР} + I_{ПР},$$

где  $I_T$  – издержки на топливо;  $I_A$  – амортизационные отчисления;  $I_{ЗП}$  – заработная плата;  $I_{ТР}$  – текущий ремонт;  $I_{ПР}$  – прочие издержки.

Годовые издержки на топливо для АЭС, работающей по разомкнутому циклу:

Инов. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ	26

$$I_T = B_{\text{ГОД}} \cdot (C_T + C_{\text{ВЫД}}),$$

где  $B_{\text{ГОД}}$  – годовой расход ядерного топлива;  $C_T$  – цена 1 кг ядерного топлива с заданной степенью обогащения с учетом стоимость изготовления ТВЭЛов и транспортных расходов;  $C_{\text{ВЫД}}$  – стоимость выдержки отработавшего ядерного топлива в бассейнах выдержки АЭС,  $C_{\text{ВЫД}} = 25 \text{долл} / \text{кг}U$  [11].

Годовой расход ядерного топлива:

$$B_{\text{год}}^{a.z} = \frac{Q_T \cdot 365 \cdot K_y}{\bar{B}},$$

где  $Q_T$  – тепловая мощность реактора;  $K_y$  – коэффициент использования установленной мощности АЭС,  $K_y = 0,8496$ ;  $\bar{B}$  – глубина выгорания ядерного топлива,  $\bar{B} = 40(\text{МВт} \cdot \text{сут}) / \text{кг}$ .

$$B_{\text{год}}^{a.z} = \frac{3000 \cdot 365 \cdot 0,8496}{40} = 23273 \text{ кг/ГОД.}$$

Цена обогащенного урана равна:

$$C_x = C_c \cdot \frac{x-y}{c_0-y} + \left[ (2x-1) \cdot \ln\left(\frac{x}{1-x}\right) + \frac{x-y}{c_0-y} \cdot (2y-1) \cdot \ln\left(\frac{y}{1-y}\right) - \frac{x-y}{c_0-y} \cdot (2c_0-1) \cdot \ln\left(\frac{c_0}{1-c_0}\right) \right],$$

где  $C_c$  – оптовая цена 1 кг природного топлива в виде гексафторида,  $C_c = 100,45 \text{ долл} / \text{кг} \cdot U$  [12];  $x$  – обогащение топлива в активной зоне,  $x = 3,85\%$ ;  $y$  – концентрация делящегося материала в отвальном сырье,  $y = 0,3\%$ ;  $c_0$  – содержание делящегося материала в природном сырье  $c_0 = 0,71\%$ .

Подставляем значения и находим:

Инва. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инва. № дубл.	Подпись и дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ					27

$$C_x = 100,45 \cdot \frac{0,0385 - 0,003}{0,0071 - 0,003} + \left[ (2 \cdot 0,0385 - 1) \cdot \ln \left( \frac{0,0385}{1 - 0,0385} \right) + \frac{0,0385 - 0,003}{0,0071 - 0,003} \times \right. \\ \left. \times (2 \cdot 0,003 - 1) \cdot \ln \left( \frac{0,003}{1 - 0,003} \right) - \frac{0,0385 - 0,003}{0,0071 - 0,003} \cdot (2 \cdot 0,0071 - 1) \cdot \ln \left( \frac{0,0071}{1 - 0,0071} \right) \right] = \\ = 880 \text{ долл/кг U.}$$

В общей стоимости производства топлива из диоксида урана, 9 % приходится на изготовление таблеток, а 88 % на производство гексафторида урана и его обогащение [12]. Следовательно, удельная цена изготовления таблеток  $UO_2$  составит:

$$C_{UO_2} = \frac{C_x \cdot 0,09}{0,88} = \frac{880 \cdot 0,09}{0,88} = 90 \text{ долл/кг U.}$$

С учётом операций по снаряжению ТВЭЛов и контролю герметичности, а также сборки кассет и проверки изделия в сборе полная стоимость изготовления ТВЭЛов, отнесенная к 1 кг U, составляет 80 дол/кг U для ТВЭЛов в циркониевых оболочках [12].

Издержки, связанные с транспортировкой и хранением отработанного ядерного топлива,  $C_{OЯТ} \approx 60$  долл/кг ОЯТ [12].

Удельная цена свежего уранового топлива для активной зоны составит:

$$C_T = C_x + C_{UO_2} + C_{об} + C_{OЯТ} = 880 + 90 + 80 + 60 = 1111 \text{ долл/кг U.}$$

$$I_T = 23273 \cdot (1111 + 25) = 2,643 \cdot 10^7 \text{ долл.} = 1,691 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

(Курс доллара по ЦБ РФ на февраль 2016 г. 1 долл. = 64 руб.)

Амортизационные отчисления:

$$I_A = \frac{H_A}{100} \cdot K_{AЭС},$$

где  $H_A$  – норма амортизации основных фондов АЭС, примем  $H_A = 7,5\%$  [13];

$K_{AЭС}$  – капиталовложения в станцию.

$$K_{AЭС} = K_{уд} \cdot N_{AЭС},$$

где  $N_{AЭС}$  – установленная мощность АЭС,  $N_{AЭС} = 10^6 \text{ кВт}$ ;  $K_{уд}$  – удельная величина капиталовложений, по расчетам Агентства по ядерной энергетике

Ив. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Ив. № дубл.
Подпись и дата	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ	28

ОЭСР (The OECD Nuclear Energy Agency's (NEA)) на 2009 год,  
 $K_{ВД} = 3850 \text{ долл / кВт}$  [14].

$$K_{АЭС} = 3850 \cdot 10^6 = 3,85 \cdot 10^9 \text{ долл.},$$

$$I_A = \frac{7,5}{100} \cdot 3,85 \cdot 10^9 = 2,888 \cdot 10^8 \text{ долл} = 1,848 \cdot 10^{10} \text{ руб.}$$

При калькуляции себестоимости энергии учитывается зарплата всего производственного персонала станции. Годовой фонд зарплаты производственного персонала станции  $I_{ЗП}$  рассчитывается на основе выражения:

$$I_{ЗП} = I_{ЗП}^{ДОП} + I_{ЗП}^{ОСН} + ЕСН,$$

где  $I_{ЗП}^{ОСН}$  – основной годовой фонд заработной платы производственного персонала АЭС;  $I_{ЗП}^{ДОП}$  – фонд дополнительной заработной платы;  $ЕСН$  – единый социальный налог.

$$I_{ЗП}^{ОСН} = K_{П} \cdot \bar{\Phi}_{ЗП} \cdot 12,$$

где  $K_{П}$  – количество промышленно производственного персонала, для строящихся двух энергоблоков АЭС Вогл электрической мощностью 2400МВт, составляет 800 человек [15], тогда для одного блока, примем  $K_{П} = 400 \text{ чел}$ ;  $\bar{\Phi}_{ЗП}$  – средняя заработная плата на Ленинградской АЭС.

$$\bar{\Phi}_{ЗП} = \Phi_{ЗП}^{14} \cdot i^{15} \cdot i^{16},$$

где  $\Phi_{ЗП}^{14}$  – средняя заработная плата на ЛАЭС в 2014г.,  $\Phi_{ЗП}^{14} = 70290 \text{ руб.}$ ,  
 $i^{15}, i^{16}$  – уровень инфляции в 2015 и 2016 годах.

$$\bar{\Phi}_{ЗП} = 70290 \cdot 1,129 \cdot 1,0496 = 83290 \text{ руб.},$$

$$I_{ЗП}^{ОСН} = 400 \cdot 83290 \cdot 12 = 3,998 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

Из фонда дополнительной заработной платы осуществляется оплата очередных отпусков и другие выплаты, не связанные с рабочим временем. Фонд дополнительной заработной платы обычно определяется в процентах (8-10%) от фонда основной заработной платы:

Инь. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инь. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата



## 2.2. Эксплуатационные издержки энергоблока 3 Ростовской АЭС

На реакторной установке третьего энергоблока Ростовской АЭС осуществлен переход на 18-месячный топливный цикл с увеличенной тепловой мощностью. Эти факторы повлияют на изменение эксплуатационных издержек, а именно, изменятся затраты на топливо. Это связано с тем, что для более длинного топливного цикла необходимо более высокое обогащение и выгорание топлива, что повлияет на увеличение КИУМа.

Годовые издержки на топливо для АЭС, работающей по разомкнутому циклу:

$$I_T^{104} = B_{\text{ГОД}} \cdot (C_T + C_{\text{ВЫД}}^{104}),$$

где  $C_{\text{ВЫД}}^{104}$  – стоимость выдержки отработавшего ядерного топлива в

бассейнах выдержки АЭС,  $C_{\text{ВЫД}}^{104} = \frac{C_{\text{ВЫД}}}{1,5}$ .

Годовой расход ядерного топлива:

$$B_{\text{год}}^{a.z} = \frac{Q_T \cdot 365 \cdot K_y}{\bar{B}},$$

где  $Q_T$  – тепловая мощность реактора,  $Q_T^{104} = 3120 \text{ МВт}$ ;  $K_y$  – коэффициент использования установленной мощности АЭС,  $K_y^{104} = 0,9309$ ;  $\bar{B}$  – глубина выгорания ядерного топлива,  $\bar{B} = 55 (\text{МВт} \cdot \text{сут}) / \text{кг}$ .

$$B_{\text{год}}^{a.z} = \frac{3120 \cdot 365 \cdot 0,9309}{55} = 19288 \text{ кг/год.}$$

Цена обогащенного урана равна:

$$C_x = C_c \cdot \frac{x-y}{c_0-y} + \left[ (2x-1) \cdot \ln\left(\frac{x}{1-x}\right) + \frac{x-y}{c_0-y} \cdot (2y-1) \cdot \ln\left(\frac{y}{1-y}\right) - \frac{x-y}{c_0-y} \cdot (2c_0-1) \cdot \ln\left(\frac{c_0}{1-c_0}\right) \right],$$

где  $x$  – обогащение топлива в активной зоне,  $x = 5,00\%$ .

Подставляем значения и находим:

Инва. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инва. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

$$C_x = 100,45 \cdot \frac{0,05 - 0,003}{0,0071 - 0,003} + \left[ (2 \cdot 0,05 - 1) \cdot \ln \left( \frac{0,05}{1 - 0,05} \right) + \frac{0,05 - 0,003}{0,0071 - 0,003} \times \right. \\ \left. \times (2 \cdot 0,003 - 1) \cdot \ln \left( \frac{0,003}{1 - 0,003} \right) - \frac{0,05 - 0,003}{0,0071 - 0,003} \cdot (2 \cdot 0,0071 - 1) \cdot \ln \left( \frac{0,0071}{1 - 0,0071} \right) \right] = \\ = 1164 \text{ долл/кг U.}$$

Следовательно, удельная цена изготовления таблеток  $UO_2$  составит:

$$C_{UO_2} = \frac{C_x \cdot 0,09}{0,88} = \frac{1164 \cdot 0,09}{0,88} = 119 \text{ долл/кг U.}$$

$$C_{об} = 80 \text{ долл/кг U.}$$

Издержки на транспортировку ОЯТ:

$$C_{ОЯТ}^{104} = \frac{C_{ОЯТ}}{1,5} = 40 \text{ долл/кг ОЯТ}$$

Удельная цена свежего уранового топлива для активной зоны составит:

$$C_T^{104} = C_x + C_{UO_2} + C_{об} + C_{ОЯТ}^{104} = 1164 + 119 + 80 + 40 = 1404 \text{ долл/кг U.}$$

$$I_T^{104} = 19288 \cdot \left( 1404 + \frac{25}{1,5} \right) = 2,739 \cdot 10^7 \text{ долл.} = 1,753 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Ежегодные эксплуатационные издержки:

$$I_{АЭС}^{104} = I_T^{104} + I_A + I_{ЗП} + I_{ТР} + I_{ПР},$$

$$I_{АЭС}^{104} = 1,753 \cdot 10^9 + 1,848 \cdot 10^{10} + 5,665 \cdot 10^8 + 3,696 \cdot 10^9 + 6,468 \cdot 10^9,$$

$$I_{АЭС} = 3,096 \cdot 10^{10} \text{ руб.},$$

Определим отпуск за год электроэнергии потребителю, так как второй контур реакторной установки остался неизменным, то и электрическая мощность станции не изменилась, а тепловая увеличилась, значит КПД станции снизился:

$$\mathcal{E}_{отп}^{104} = \frac{Q_T^{104} \cdot \eta_{нетто}^{АЭС}}{1,04} \cdot h_V^{104},$$

где  $h_V^{104}$  – число часов использования установленной мощности;

$$h_V^{104} = K_V^{104} \cdot 8760 = 0,931 \cdot 8760 = 8155 \text{ час},$$

$$\mathcal{E}_{отп}^{104} = \frac{3120 \cdot 0,3}{1,04} \cdot 8155 = 7,633 \cdot 10^6 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Эксплуатационная составляющая себестоимости электроэнергии:

ФЮРА.693100.001.ПЗ

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Ивн. № подл.	Взам. инв. №	Ивн. № дубл.	Подпись и дата	

$$S_{АЭС}^{104} = \frac{3,096 \cdot 10^{10}}{7,633 \cdot 10^6} = 4,057 \frac{руб}{кВт \cdot ч}$$

$$\Delta S = \frac{S_{АЭС} - S_{АЭС}^{104}}{S_{АЭС}} = \frac{4,613 - 4,057}{4,613} = 12,1\%$$

### 2.3. Экономический эффект

В общем случае, экономический эффект – разность между результатами деятельности хозяйствующего субъекта и произведенными для их получения затратами на изменения условий деятельности:

$$\mathcal{E}_{год} = (S_{АЭС} - S_{АЭС}^{104}) \cdot \mathcal{E}_{омн}^{104} = (4,613 - 4,057) \cdot 10^3 \cdot 7,633 \cdot 10^6 = 4,249 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Далее выполним оценку с учетом перегрузки ядерного топлива, которая на энергоблоках с ВВЭР осуществляется при полностью остановленном ядерном реакторе ЯР и обычно совмещается с ремонтом оборудования.

В программе перегрузки ЯТ, разрабатываемой персоналом АЭС, определяются важнейшие укрупненные этапы перестановки основных групп ТВС, а также порядок и перечень транспортно-технологического оборудования, используемого при перемещении ТВС. Рабочий график перегрузки ЯТ подробно описывает для каждой ТВС маршрут ее движения: номер и тип ТВС, координаты ячейки активной зоны или БВ, откуда извлекается ТВС, а также ячейки, куда она устанавливается.

Для перегрузки ЯТ используются перегрузочные машины. Мост перемещается над ЯР и БВ. На мосту имеется передвижная тележка с рабочей штангой и системой телевизионного контроля. Мост и тележка перемещаются во взаимно-перпендикулярных направлениях. Этим обеспечивается возможность автоматического или дистанционного вывода перегрузочной машины в точку с заданными координатами в активной зоне или БВ.

После остановки ЭБ, расхолаживания ЯР, ввода борной кислоты в теплоноситель первого контура для обеспечения необходимой под-критичности активной зоны снимают верхний блок (крышку) и блок защитных труб ЯР, закрывающие доступ к активной зоне. Крышку и блок защитных труб ЯР

Инва. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инва. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ	33

помещают в цилиндрические колодцы вблизи ЯР (в качестве временного варианта крышку реактора размещают на полу центрального зала). Все операции по разборке выполняются при условии заполнения ЯР теплоносителем до уровня главного разъема. В БВ уровень воды поднимается до отметки б:

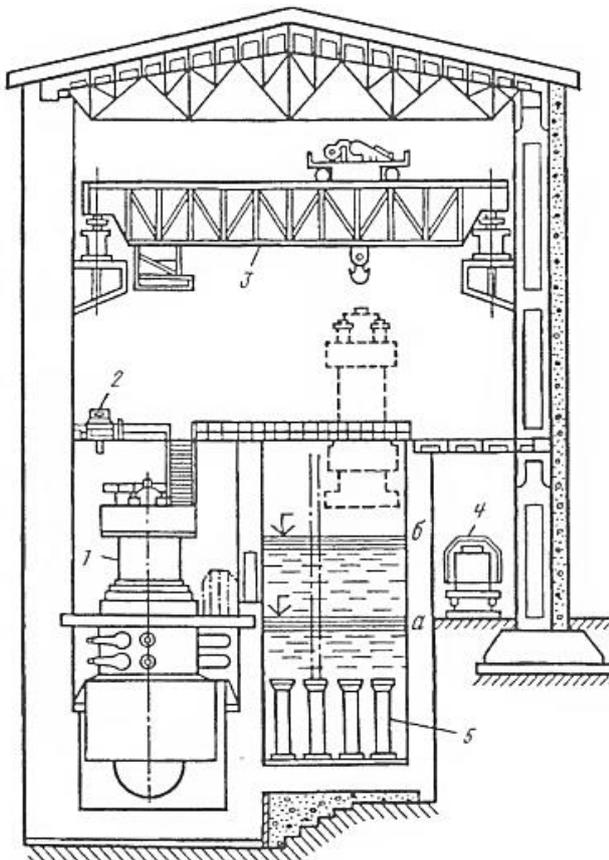


Рисунок 6.1 – Схема транспортно-технологического оборудования для перегрузки топлива на ЭБ с ВВЭР: 1 — реактор; 2 — перегрузочная машина; 3 — мостовой кран; 4 — транспортный коридор; 5 — чехлы для отработавших ТВС [11].

Продолжительность перегрузки ЯТ для ВВЭР составляет 15-25 сут. При частичной перегрузке ЯТ один раз в год проводятся замена 1/3 и внутренние перестановки выгоревших ТВС в зависимости от схемы перегрузки. До 30-40% общей трудоемкости всех операций при частичной перегрузке составляют внутренние перестановки части выгоревших ТВС, оставляемых в ЯР для дальнейшей работы.

Инва. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инва. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

Благодаря переходу на 18 месячный топливный цикл, перегрузка топлива осуществляется раз в полтора года, что снижает годовые издержки на перегрузку топлива в полтора раза. По данным полученным с АЭС, затраты на перегрузку составляют  $I_{ПЗ} = 12 \cdot 10^5$  руб..

$$\mathcal{E}_{ГОД}^{ПЗ} = (S_{АЭС} - S_{АЭС}^{104}) \cdot \mathcal{E}_{омн}^{104} + (I_{ПЗ} - I_{ПЗ}^{104}),$$

где  $I_{ПЗ}$ ,  $I_{ПЗ}^{104}$  – затраты на перегрузку топлива по 12 и 18-месячному топливным циклам.

$$I_{ПЗ}^{104} = \frac{I_{ПЗ}}{1,5} = \frac{12 \cdot 10^5}{1,5} = 8 \cdot 10^5 \text{ руб.},$$

$$\mathcal{E}_{ГОД}^{ПЗ} = (4,613 - 4,057) \cdot 10^3 \cdot 7,633 \cdot 10^6 + (12 \cdot 10^5 - 8 \cdot 10^5) = 4,25 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

#### 2.4. Оценка прибыли и рентабельности энергоблоков АЭС

Оценим чистую прибыль для энергоблока 3 РоАЭС и серийного образца реактора ВВЭР-1000.

Для оценки возьмем одноставочный тариф на электроэнергию в Ленинградской области за 1кВт · ч составляет 3,55 руб.

Годовая выработка электроэнергии энергоблока 3 Ростовской АЭС и серийного энергоблока:

$$\mathcal{E}_{омн}^{104} = 7,633 \cdot 10^6 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.,$$

$$\mathcal{E}_{омн} = 6,698 \cdot 10^6 \text{ МВт} \cdot \text{ч}..$$

Уровень балансовой прибыли АЭС для 3 РоАЭС и серийного ВВЭР-100:

$$ПР_{\sigma}^{104} = T \cdot \mathcal{E}_{омн}^{104} = 3,55 \cdot 10^3 \cdot 7,633 \cdot 10^6 = 2,71 \cdot 10^{10} \text{ руб.},$$

$$ПР_{\sigma} = T \cdot \mathcal{E}_{омн} = 3,55 \cdot 10^3 \cdot 6,698 \cdot 10^6 = 2,378 \cdot 10^{10} \text{ руб.}$$

Налог на прибыль для АЭС:

$$H_{ПР}^{104} = 0,2 \cdot ПР_{\sigma}^{104} = 0,2 \cdot 2,71 \cdot 10^{10} = 5,419 \cdot 10^9 \text{ руб.},$$

$$H_{ПР} = 0,2 \cdot ПР_{\sigma} = 0,2 \cdot 2,378 \cdot 10^{10} = 4,756 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Чистая прибыль АЭС:

Инва. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инва. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

$$PP_q^{104} = PP_{\delta}^{104} - H_{IP}^{104} = 2,71 \cdot 10^{10} - 5,419 \cdot 10^9 = 2,168 \cdot 10^{10} \text{ руб.}$$

$$PP_q = PP_{\delta} - H_{IP} = 2,378 \cdot 10^{10} - 4,756 \cdot 10^9 = 1,902 \cdot 10^{10} \text{ руб.}$$

## 2.5. Оценка экономической эффективности инвестиций

Сравним эффективность инвестирования средств в рассмотренные энергоблоки, для этого рассчитаем чистый дисконтированный доход (ЧДД) и внутреннюю норму доходности (ВНД):

$$NPV = -K_{AЭС} + \sum_{t=1}^T \frac{D_t}{(1+r)^t} = -K_{AЭС} + \sum_{t=1}^T \frac{Pr_t + A_t - K_t}{(1+r)^t}.$$

где  $NPV$  – чистый дисконтированный доход инвестиционного проекта;  $D_t$  – денежный поток в период времени  $t$ ;  $K_{AЭС}$  – капитальные затраты строительство АЭС;  $r$  – ставка дисконтирования (барьерная ставка), для атомной энергетики примем  $r = 10\%$ .

$$D_t = Pr_t + A_t - K_t,$$

где  $Pr_t$ ,  $A_t$ ,  $K_t$  – соответственно чистая прибыль, амортизация и инвестиции в  $t$ -ом году;

Время эксплуатации энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000:

$$T = T_{\text{экспл}} = 30 \text{ лет},$$

С экономической точки зрения ставка дисконтирования — это норма доходности на вложенный капитал, требуемая инвестором. Иначе говоря, с ее помощью можно определить сумму, которую инвестору придется заплатить сегодня за право получить предполагаемый доход в будущем. Поэтому от значения показателя зависит принятие ключевых решений, в том числе при выборе инвестиционного проекта.

Представим график зависимости  $NPV$  от времени, по которому можно определить срок окупаемости проекта.

Инва. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инва. № дубл.	Подпись и дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ					36

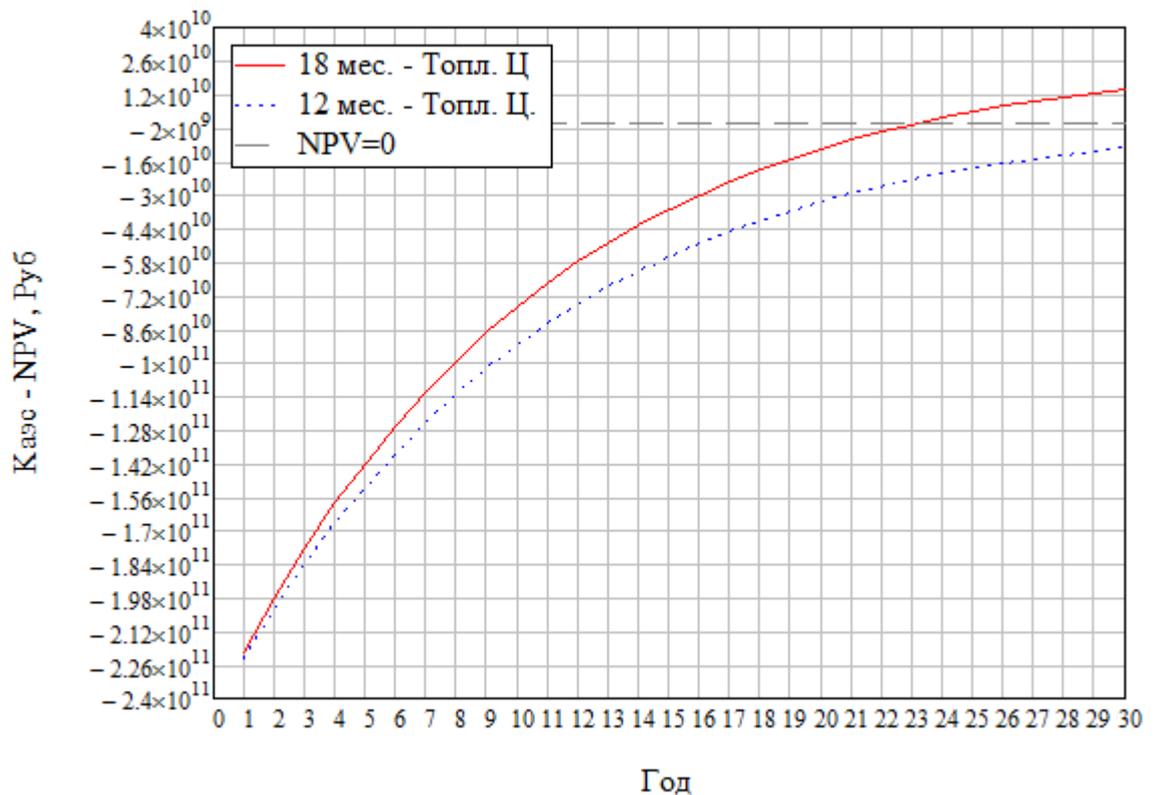


Рисунок 6.2 – Зависимость чистого приведенного дохода NPV от времени t

Внутренняя норма доходности представляет собой ту норму дисконта ( $IRR$ ), при которой величина приведенных эффектов равна приведенным капиталовложениям, т.е.  $NPV = 0$ .

Иными словами  $IRR$  (ВНД) является решением уравнения:

$$K_{AЭС} = \sum_{t=1}^T \frac{D_t}{(1 + IRR)^t}$$

Экономическую природу этого показателя можно пояснить с помощью графика зависимости ЧДД от изменения нормы дохода.

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ					37

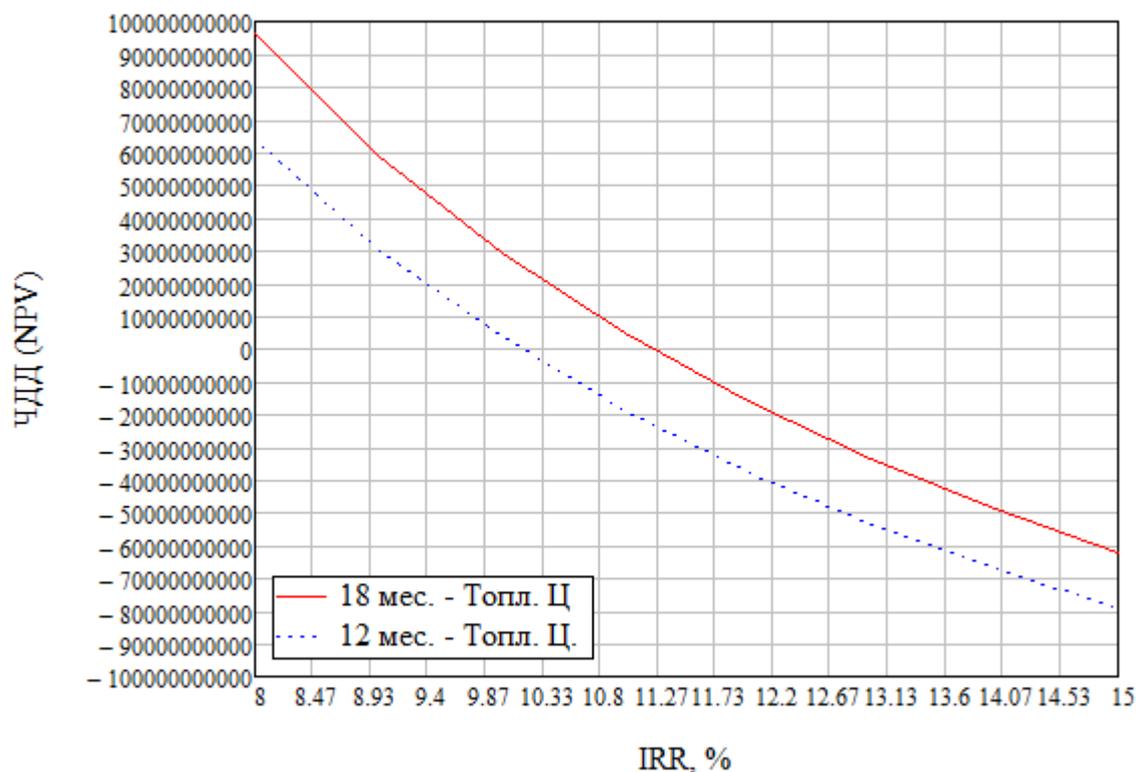


Рисунок 6.3 – Зависимость изменения ЧДД от нормы доходности

Из Рисунок 6.2 видно, что срок окупаемости проекта третьего энергоблока РоАЭС 22 года, а внутренняя норма доходности Рисунок 6.3 11,3%. В данном случае, ВНД больше требуемой инвестором нормы дохода на капитал, следовательно, инвестиции в данный инвестиционный проект оправданы, и может рассматриваться вопрос о его принятии.

Для серийного блока ВВЭР-1000, наблюдается обратная картина, ставки дисконтирования в 10% для данного проекта недостаточно, чтобы проект окупился за 30 лет, об этом и свидетельствует норма внутренней доходности в 10,2%. Значит для серийного энергоблока необходимо продлить срок эксплуатации или повышать ставку дисконтирования, чтобы проект стал привлекательным для инвестирования.

Анализируя полученные результаты, можем сделать вывод о экономическом эффекте при переходе на удлиненный топливный цикл, так как это приводит к снижению себестоимости электроэнергии на 12% и снижению срока окупаемости станции приблизительно на 10 лет.

Инь. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата
Инь. № дубл.	Подпись и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------