



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
Специальность 14.03.02 «Ядерные физика и технологии»
Отделение ядерно-топливного цикла

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема работы
Исследование нейтронно-физических характеристик реактора типа ВВЭР-СКД с МОХ-топливом

УДК 621.039.524.441:621.039.51

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A93	Григорьева Анна Вадимовна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Юрий Борисович	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Селиванникова Ольга Валерьевна			

Томск – 2023 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
Универсальные	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
Общепрофессиональные	
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
Профессиональные	
ПК(У)-1	Способен использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы
ПК(У)-2	Способен проводить математическое моделирование процессов и объектов атомной отрасли с использованием стандартных методов и компьютерных кодов для проектирования и анализа
ПК(У)-3	Готов к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу полученных экспериментальных данных
ПК(У)-4	Способен использовать технические средства для измерения основных параметров объектов исследования
ПК(У)-5	Готов к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
ПК(У)-6	Способен использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу исходных данных для проектирования объектов атомной отрасли
ПК(У)-7	Способен к расчету и проектированию деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием
ПК(У)-8	Готов к разработке проектной и рабочей технической документации, оформлению законченных проектно-конструкторских работ
ПК(У)-9	Способен к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам
ПК(У)-10	Готов к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных решений при разработке установок и приборов
ПК(У)-11	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования
ПК(У)-12	Готов к эксплуатации современного физического оборудования, приборов и технологий
ПК(У)-13	Способен к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда
ПК(У)-14	Готов разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, сверхвысокочастотных и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем
ПК(У)-15	Способен к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
Специальность 14.03.02 «Ядерные физика и технологии»
Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП/ОПОП

(Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
0A93	Григорьева Анна Вадимовна

Тема работы:

Исследование нейтронно-физических характеристик реактора типа ВВЭР-СКД с МОХ-топливом	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	31.01.2023 №31-8/с

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <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 функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Модель реактора ВВЭР-СКД в ПО MSU; – ТВС центральной части активной зоны реактора ВВЭР-СКД; – 1, 5, 10, 15, 19,9 % содержание делящегося материала в топливе .
<p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке <i>(аналитический обзор литературных источников 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>	<p>Введение: цель работы, актуальность, практическая значимость работы; Основная часть: обзор особенностей реакторов 4 поколения, особенности реактора ВВЭР-СКД и свойства теплоносителя со сверхкритическими параметрами теплоносителя, анализ топливных композиций, описание расчетной модели, анализ полученных результатов, расчет себестоимости проведения исследовательской работы, разработка</p>

	производственной безопасности при проведении экспериментов.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<ul style="list-style-type: none"> – чертеж ТВЭЛ РУ ВВЭР-1000; – спецификация к чертежу; – презентация.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна
Социальная ответственность	Передерин Юрий Владимирович
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	

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

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А93	Григорьева Анна Вадимовна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A93	Григорьевой Анне Вадимовне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет НИИ – 111837 руб. Затраты на з/п – 78724 руб. Материальные затраты НИИ – 9432 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию – 4,39 руб. за кВт·ч
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30% Районный коэффициент – 1,3 Накладные расходы – 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Сравнение конкурентных технических решений
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	1. Иерархическая структура работ; 2. SWOT-анализ; 3. Календарный план-график реализации проекта. Бюджет научно-технического исследования: – расчет материальных затрат; – расчет основной и дополнительной заработной платы исполнителей темы; – отчисления на социальные нужды; – накладные расходы; – формирование бюджета затрат.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Матрица SWOT
4. Альтернативы проведения НИ
5. График проведения и бюджет НИ
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A93	Григорьева Анна Вадимовна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А93	Григорьевой Анне Вадимовне

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, ионизирующее излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	– электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ;
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды:	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства и меры защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды:	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, меры предотвращения).

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А93	Григорьева Анна Вадимовна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 103 страницы, 25 рисунков, 33 таблицы, 3 приложения, 1 чертеж, 1 спецификацию.

Ключевые слова: нейтронно-физический расчет, ТВС реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя, МСУ, смешанное уран-плутониевое топливо, смешанное уран-ториевое топливо, оптимизация параметров ТВЭЛ.

Объектом исследования является водо-водяной энергетический реактор со сверхкритическими параметрами теплоносителя.

Цель работы – проведение расчетов с использованием программного комплекса МСУ и обоснование нейтронно-физических характеристик вариантов водо-водяного энергетического реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя, с быстросонансным спектром нейтронов.

В процессе исследования проводился расчет и сравнение длительности кампании, запаса реактивности и глубины выгорания различных топливных композиций, оптимизация внешнего диаметра ТВЭЛ, исследование температурных эффектов и размножающих свойств ТВС, находящейся в центральной зоне реактора типа ВВЭР-СКД, в программе МСУ.

В результате проведенных исследований было выявлено, что рекомендуется рассмотреть возможность использования смешанного уран-плутониевого топлива ($\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$) с низким обогащением в реакторной установке ВВЭР-СКД с учетом оптимальных значений диаметра ТВЭЛ и топлива. Дополнительные исследования и расчеты могут быть проведены для более подробного анализа и оптимизации параметров данного типа реактора.

Степень внедрения: высокая.

Область применения: ядерная энергетика.

Экономическая эффективность/значимость работы: высокая.

В будущем планируется провести расчеты в контексте использования реактора ВВЭР-СКД в замкнутом топливном цикле.

Обозначения и сокращения

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор

РУ – реакторная установка

СКД – сверхкритическое давление

АЭС – атомная электростанция

ТВС – тепловыделяющая сборка

КПД – коэффициент полезного действия

МОХ – Mixed oxide fuel

MCU – Monte Carlo Universal

ЦРД – цепная реакция деления

Содержание

Введение.....	12
1 Литературный обзор.....	14
1.1 Реакторы IV поколения.....	14
1.2 Особенности реактора типа ВВЭР-СКД.....	16
1.3 Свойства теплоносителя в реакторе типа ВВЭР-СКД.....	19
1.4 Перспективы использования реакторов ВВЭР-СКД в замкнутом топливном цикле.....	23
1.5 Выбор материалов топлива	25
2 Нейтронно-физический расчет.....	28
2.1 Программный комплекс МСУ	28
2.2 Описание расчетной модели	29
2.3 Исследование различных топливных композиций в ТВС реактора типа ВВЭР-СКД.....	33
2.4 Исследование эффектов реактивности.....	43
2.5 Исследование размножающих свойств ТВС ВВЭР-СКД	46
2.6 Исследование влияния содержания плутония в МОХ-топливе на нейтронно-физические характеристики реактора типа ВВЭР-СКД.....	49
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	53
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	53
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений	55
3.1.2 SWOT-анализ	57
3.2 Планирование управления научно-техническим проектом.....	61
3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	61
3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	63
3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	64
3.3 Бюджет научного исследования	65
3.3.1 Расчет материальных затрат.....	66
3.3.2 Основная заработная плата исполнительной темы.....	68

3.3.3 Расчет дополнительной заработной платы	70
3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды	71
3.3.5 Накладные расходы	72
3.3.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта	72
3.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	73
4 Социальная ответственность	77
4.1 Компоновка исследовательской рабочей зоны	77
4.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов	78
4.3 Освещённость рабочей зоны	79
4.4 Превышение уровня шума	81
4.5 Микроклимат	82
4.6 Радиационная безопасность	83
4.7 Электробезопасность	84
4.8 Пожарная и взрывная безопасность	85
4.9 Аварийные и чрезвычайные ситуации на предприятии	88
4.10 Вывод по разделу	88
Заключение	90
Список использованных источников	92
Приложение А	96
Приложение Б	98
Приложение В	102

Введение

Реакторы четвертого поколения являются следующим шагом в развитии ядерных технологий и представляют собой новое поколение ядерных реакторов. Они разрабатываются с целью преодоления некоторых ограничений и проблем, характерных для предыдущих поколений реакторов. Реакторы четвертого поколения обладают более безопасной и устойчивой конструкцией, а также предлагают новые возможности для эффективного использования ядерной энергии.

Реакторы четвертого поколения также предлагают возможность использования новых видов топлива, включая уран-плутониевые смеси, торий и другие. Однако, разработка и внедрение реакторов четвертого поколения требует дальнейших научных исследований, испытаний и инженерных разработок.

В контексте развития ядерной энергетики, реакторы ВВЭР-СКД (сверхкритического давления) представляют собой новое поколение реакторов с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками. Однако, исследования и расчеты нейтронно-физических параметров таких реакторов с применением МОХ-топлива находятся только в начальной стадии разработки. Проведение данного исследования позволит более глубоко изучить особенности работы реактора ВВЭР-СКД с МОХ-топливом, его эффективность и безопасность, а также внести новые знания в область ядерной физики и инженерии. Результаты данного исследования будут иметь практическую значимость для дальнейшего развития ядерных реакторных систем и оптимизации использования МОХ-топлива в ядерной энергетике.

Целью данной работы является проведение расчетов с использованием программного комплекса MCU и обоснование нейтронно-физических характеристик вариантов водо-водяного энергетического реактора со

сверхкритическими параметрами теплоносителя, с быстрозонансным спектром нейтронов.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- разработка расчетной модели ТВС, находящейся в центральной части активной зоны реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя (в дальнейшем ВВЭР-СКД) с использованием программного комплекса MSU;
- оценка кампании ядерного топлива, запаса реактивности, глубины выгорания с использованием различных топливных композиций;
- проведение оптимизации параметров, обработка полученных результатов и выбор наиболее оптимального варианта топлива;
- оценка условий сохранения характеристик безопасности РУ, в том числе выполнение отрицательного или ограниченного по модулю температурного и плотностного эффекта реактивности;
- исследование размножающих свойств выбранной топливной композиции;
- исследование влияния содержания плутония в МОХ-топливе на различные нейтронно-физические характеристики.

1 Литературный обзор

1.1 Реакторы IV поколения

Реакторы четвертого поколения представляют собой новое поколение ядерных реакторов, которые разрабатываются для решения многих проблем, связанных с использованием ядерной энергии. Эти реакторы отличаются от предыдущих поколений более безопасной, экономически эффективной и устойчивой конструкцией, а также предлагают новые возможности для использования ядерной энергии.

Одной из главных проблем, которую решают реакторы 4 поколения, является снижение рисков ядерной энергетики. Реакторы этого поколения обладают более высокой степенью безопасности, так как используют новые технологии и материалы, позволяющие снизить вероятность аварии и минимизировать ее последствия. Это особенно важно в свете трагических событий на Чернобыльской АЭС и Фукусимской АЭС.

Кроме того, реакторы четвертого поколения предлагают новые возможности для использования ядерной энергии. Они могут работать на более разнообразных топливах, что позволяет снизить зависимость от урана и увеличить эффективность использования ядерной энергии. Также реакторы 4 поколения могут быть использованы для производства различных изотопов, которые находят применение в медицине, промышленности и науке.

В связи с этим, использование реакторов четвертого поколения может стать одним из способов удовлетворения растущего мирового спроса на энергию, уменьшения выбросов парниковых газов и увеличения энергетической независимости стран.

Реакторы четвертого поколения представляют собой перспективное направление в развитии ядерной энергетики, основной задачей которого является обеспечение высокой эффективности использования ядерного топлива, уменьшения объемов высокоактивных отходов и повышения уровня безопасности эксплуатации реакторных установок.

Основными требованиями к реакторам четвертого поколения являются:

- увеличение коэффициента использования ядерного топлива.

Реакторы нового поколения должны быть способны производить больше электроэнергии на единицу потребляемого ядерного топлива. Это достигается за счет повышения температуры рабочего тела, увеличения энергетической мощности реактора и использования переработанных ядерных отходов;

- уменьшение объемов высокоактивных отходов. Реакторы нового поколения должны быть способны производить меньше высокоактивных отходов на единицу произведенной электроэнергии. Это достигается за счет использования переработанных ядерных отходов, повышения коэффициента использования ядерного топлива и оптимизации конструкции реактора;

- повышение уровня безопасности эксплуатации реакторных установок. Реакторы нового поколения должны быть способны обеспечивать высокий уровень безопасности эксплуатации и минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций. Для этого применяются различные конструктивные решения, такие как улучшенная система охлаждения, автоматическая система управления, улучшенная система защиты от выбросов радиоактивных веществ и другие технические решения.

Конструктивные особенности реакторов четвертого поколения могут включать в себя:

- использование новых типов топлива и оболочек топливных элементов;

- использование более эффективной системы охлаждения, которая позволяет увеличить температуру рабочего тела и повысить коэффициент использования ядерного топлива;

- использование систем автоматического управления, которые обеспечивают высокую точность и надежность регулирования реакторной установки;

- использование новых материалов для конструкции реактора, обеспечивающих высокую прочность и термическую стабильность при высоких температурах;
- использование различных устройств и систем защиты, например, систем защиты от выбросов радиоактивных веществ, системы защиты от аварийной ситуации и других технических решений.

1.2 Особенности реактора типа ВВЭР-СКД

Реакторы типа ВВЭР-СКД (водо-водяной энергетический реактор со сверхкритическим давлением) представляют собой новое поколение (IV-поколение) ядерных энергетических установок, разрабатываемых в последние годы. Они предназначены для генерации электрической энергии, и отличаются от своих предшественников, реакторов ВВЭР-1000, рядом принципиальных отличий.

Основная особенность реактора ВВЭР-СКД заключается в том, что он использует в качестве теплоносителя воду, находящуюся в сверхкритическом состоянии. Это означает, что вода находится в состоянии, при котором ее плотность и вязкость находятся на границе между жидкостью и газом (рисунок 1.1). Таким образом, теплоноситель становится более плотным, а также обладает большей теплопроводностью и способностью к турбулентному перемешиванию. Это позволяет добиться большей эффективности процесса нагрева воды и, как следствие, увеличить энергетическую мощность реактора.

Одним из главных преимуществ реакторов СКД является высокий коэффициент использования топлива. За счет использования более эффективных методов нагрева воды, удалось снизить потребность в топливе на 30-40%. Кроме того, реакторы СКД обладают большей гибкостью в

управлении энергетическим режимом, что позволяет быстрее реагировать на изменения потребности в электроэнергии.

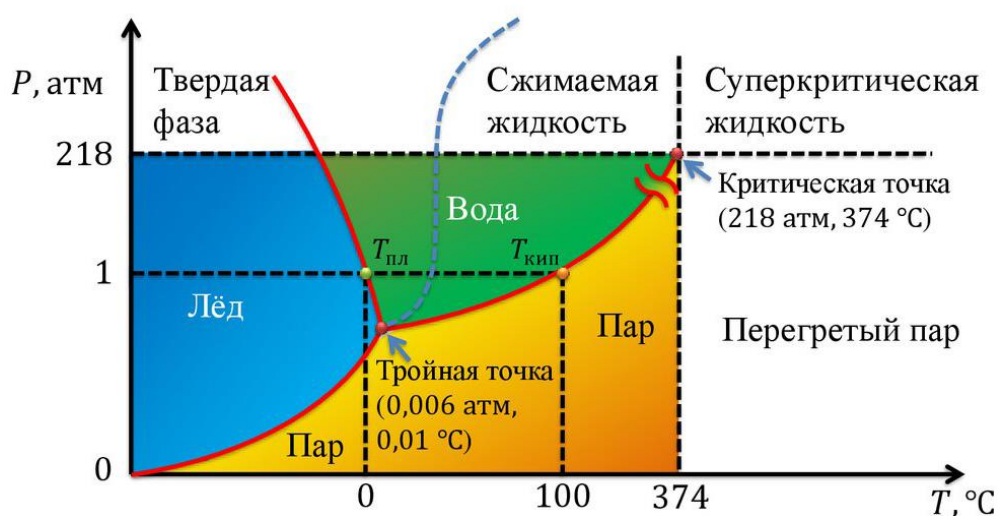


Рисунок 1.1 – Фазовая диаграмма воды

КПД реактора ВВЭР-СКД может достигать 40-45%, что является высоким показателем в сравнении с другими типами реакторов. Однако, точный показатель зависит от многих факторов, таких как техническое состояние реактора, тип используемого топлива и т.д. [4]

Исследования в этой области проводятся многими учеными и организациями. В одной из последних работ (А. Г. Коротких, 2021) были проведены расчеты теплогидравлических параметров реактора ВВЭР-СКД. В результате была произведена оптимизация параметров реактора, что позволило увеличить его КПД и снизить затраты на производство [5].

Исследования в области реакторов будущего активно ведутся во многих странах. Одним из направлений развития является создание так называемых реакторов четвертого поколения. Они предполагают использование продвинутых технологий и материалов, которые позволят существенно увеличить безопасность и эффективность работы реакторов.

В одном из вариантов реактора четвертого поколения, называемом реакторе на быстрых нейтронах (Fast Neutron Reactor, FNR), используются

быстрые нейтроны, что позволяет более эффективно использовать ядерное топливо. Кроме того, в FNR используется замкнутый ядерный топливный цикл, что позволяет минимизировать количество радиоактивных отходов и эффективно использовать ядерное топливо.

Конструкция реактора ВВЭР-СКД отличается от ВВЭР-1000 не только упрощением, но и некоторыми отсутствующими компонентами. Одним из таких компонентов является генератор пара (турбогенератор), который используется для преобразования тепловой энергии, вырабатываемой реактором, в электрическую энергию. Вместо турбогенератора в ВВЭР-СКД применяется компактный генератор тепловой энергии, который обеспечивает производство тепловой энергии для производственных нужд, а также для генерации электроэнергии в сочетании с турбиной малой мощности (рисунок 1.2).

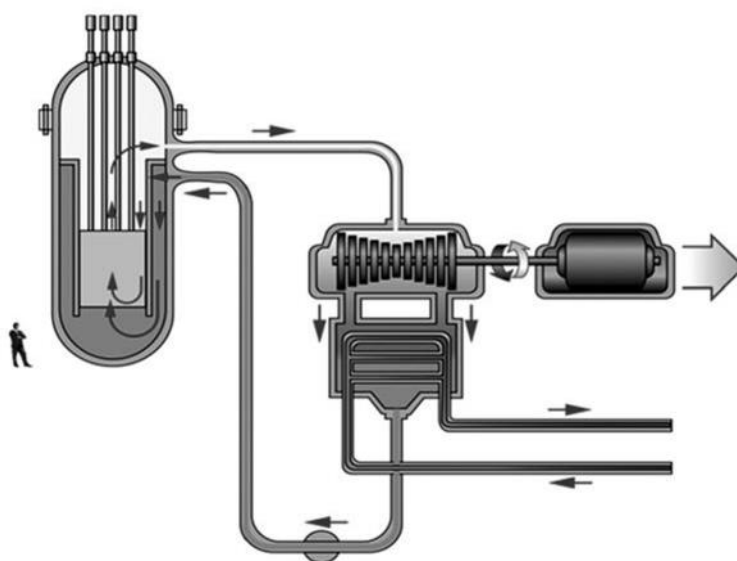


Рисунок 1.2 – Реактор ВВЭР-СКД

Кроме того, в реакторе ВВЭР-СКД нет водяных резервуаров, которые используются в ВВЭР-1000 для обеспечения охлаждения реактора в аварийных ситуациях. Вместо этого в ВВЭР-СКД используется сухое охлаждение, которое предполагает использование естественной конвекции и теплоотвода через теплообменники. Это уменьшает количество систем и

оборудования, что приводит к уменьшению затрат на эксплуатацию реактора и увеличению его надежности.

1.3 Свойства теплоносителя в реакторе типа ВВЭР-СКД

В сверхкритическом состоянии теплоноситель имеет ряд особенных свойств, таких как отсутствие различия между жидкой и газообразной фазами. Это и другие свойства обеспечивают более эффективную передачу тепла и повышают КПД реактора.

Одним из важных свойств теплоносителя является его теплопроводность. В сверхкритическом состоянии теплоноситель обладает высокой теплопроводностью, что позволяет эффективно отводить тепло от топлива. Кроме того, в этом состоянии теплоноситель имеет меньшую плотность, что способствует увеличению скорости движения теплоносителя и, следовательно, повышению эффективности теплообмена.

Таблица 1.2 – Свойства воды при различных параметрах

Свойства	Обычная вода	Вода со сверхкритическими параметрами
Температура кипения, °С	100	374 (P=22,1 МПа)
Давление насыщенных паров при температуре кипения, МПа	0,101	22,1
Плотность при нормальных условиях, кг/м ³	1000	318
Критическая температура, °С	374	374
Критическое давление, МПа	22,1	22,1
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,606	0,3-0,4
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	4,18	1,5-2,0
Вязкость, Па·с	0,00089	0,0002-0,002

Как видно из таблицы 1.2, вода со сверхкритическими параметрами имеет высокую температуру кипения и давление насыщенных паров, что

позволяет ей работать как теплоноситель при очень высоких температурах и давлениях. Также сверхкритическая вода обладает существенно меньшей теплоемкостью и теплопроводностью по сравнению с обычной водой, что может оказывать влияние на технологические процессы в реакторе. Вязкость сверхкритической воды также меньше, что позволяет увеличить скорость течения и улучшить теплообмен.

Таблица 1.3 – Основные характеристики схем циркуляции теплоносителя

Характеристики / схемы	Однозаходная	Двухзаходная
Число циркуляционных контуров	1	2
Количество насосов	1	2
Направление циркуляции теплоносителя	Однонаправленное	Перекрестное
Управление нагрузкой	Регулирование мощности реактора путем изменения частоты вращения насоса	Регулирование мощности реактора путем изменения количества активных циркуляционных контуров
Распределение тепловой нагрузки	Более равномерное распределение тепловой нагрузки по активной зоне реактора	Неравномерное распределение тепловой нагрузки, сосредоточенной в каждом из циркуляционных контуров
Эффективность охлаждения теплоносителем	Высокая	Высокая
Устойчивость к внешним возмущениям	Высокая	Высокая
Трудности при эксплуатации и обслуживании	Меньше трудностей	Больше трудностей

Активная зона является одной из наиболее важных частей легководных энергетических реакторов типа ВВЭР-СКД. Это область реактора, где происходит деление ядер и производится энергия. Поэтому важно иметь оптимальную схему циркуляции теплоносителя в активной зоне для обеспечения максимальной эффективности и безопасности реактора.

В связи с этим проводится анализ схем циркуляции теплоносителя в активной зоне легководных энергетических реакторов, в том числе и реактора ВВЭР-СКД.

В исследовании проводится сравнительный анализ двух схем циркуляции теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-СКД: однозаходной и двухзаходной.

В таблице приведены основные характеристики схем циркуляции теплоносителя в реакторе ВВЭР-СКД:

Сравнительный анализ схем и характеристик циркуляции теплоносителя в однозаходной и двухзаходной схемах реактора ВВЭР-СКД с точки зрения физики позволяет выделить следующие аспекты:

- гидродинамическое поведение: в однозаходной схеме циркуляционный контур представляет собой замкнутую систему с одним направлением течения теплоносителя. Это способствует более простой гидродинамике и равномерному распределению тепла по активной зоне реактора. В двухзаходной схеме циркуляция теплоносителя перекрестная, что может приводить к неоднородному распределению тепла;

- управление нагрузкой: в однозаходной схеме регулирование мощности реактора осуществляется путем изменения частоты вращения насоса. В двухзаходной схеме регулирование мощности происходит путем изменения количества активных циркуляционных контуров. Это позволяет более гибко управлять мощностью реактора и обеспечивать стабильную работу;

- охлаждение активной зоны: обе схемы обеспечивают эффективное охлаждение активной зоны реактора, но однозаходная схема обычно обладает более равномерным распределением тепловой нагрузки. Это может быть важным фактором при проектировании и эксплуатации реактора;

- гибкость и надежность: двухзаходная схема обеспечивает большую гибкость и возможность регулирования мощности реактора за счет

наличия двух циркуляционных контуров. Однако она также требует более сложной системы насосов и может быть менее надежной в плане эксплуатации.

В данной работе в рассмотрение берется двухзаходная схема течения теплоносителя, поэтому стоит более подробно разораться в данной схеме.

Двухзаходная схема течения теплоносителя используется в реакторах типа ВВЭР-СКД для повышения эффективности охлаждения и теплопередачи в активной зоне. Она состоит из двух параллельных каналов, каждый из которых имеет отдельную систему охлаждения и свой насос для перемещения теплоносителя.

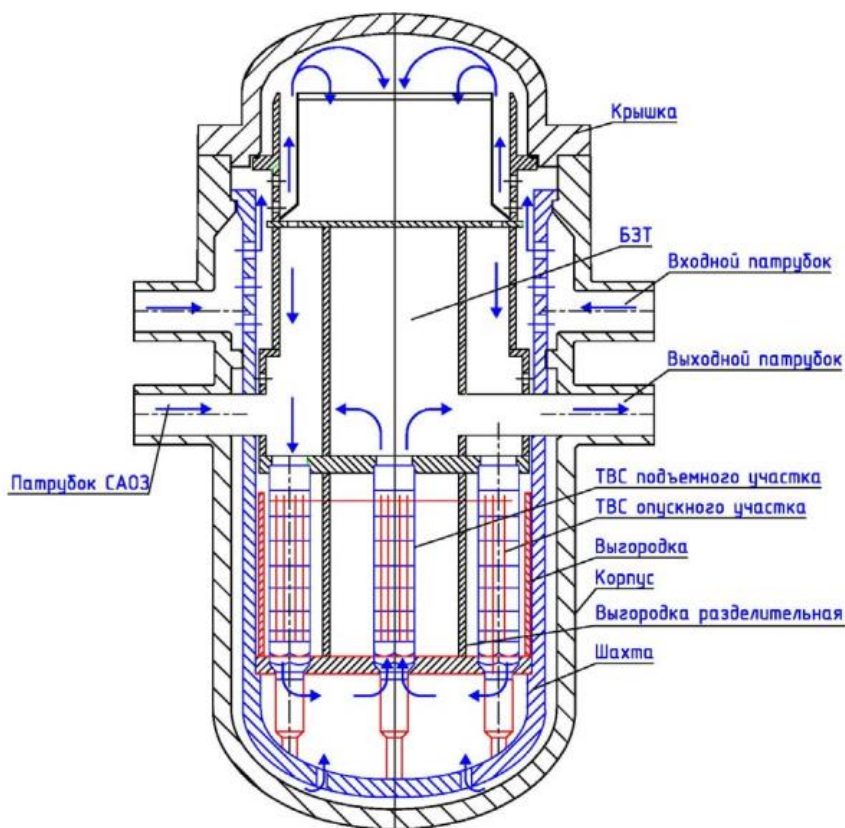


Рисунок 1.3 – Двухзаходная схема течения теплоносителя в реакторе типа ВВЭР-СКД

В каждом канале теплоноситель движется вверх от нижней части активной зоны, затем через свод и снизу входит в верхнюю часть активной зоны. Далее он проходит через область управления мощностью, где скорость

движения теплоносителя может быть изменена, и возвращается обратно в нижнюю часть активной зоны. Таким образом, теплоноситель проходит через активную зону дважды, что позволяет более эффективно отводить тепло от топлива.

Двухзаходная схема течения теплоносителя позволяет также уменьшить вероятность возникновения гидравлических колебаний и гидродинамических неустойчивостей, так как теплоноситель движется по двум параллельным каналам. Кроме того, такая схема позволяет уменьшить вероятность загрязнения активной зоны продуктами деления, так как теплоноситель проходит через фильтрующие системы при входе и выходе из активной зоны.

В целом, двухзаходная схема течения теплоносителя является эффективным решением для повышения эффективности охлаждения и теплопередачи в активной зоне реакторов типа ВВЭР-СКД.

1.4 Перспективы использования реакторов ВВЭР-СКД в замкнутом топливном цикле

Атомная энергетика в России имеет свои особенности, которые определяются историческим, технологическим и экономическим контекстом. Сегодня Россия является одной из крупнейших атомных держав в мире, и ее энергетика базируется на использовании ядерных реакторов различных типов.

Одной из ключевых особенностей атомной энергетики в России является замыкание топливного цикла, что позволяет эффективно использовать ядерное топливо и снижать его отходы. Замкнутый топливный цикл включает использование быстрых реакторов и переработку отработанного ядерного топлива.

Реакторы ВВЭР-СКД (сверхкритического давления) представляют собой одно из перспективных направлений развития ядерной энергетики. Они являются эволюционным продолжением классических ВВЭР-1000, но имеют ряд отличий, позволяющих увеличить эффективность и безопасность работы.

Реактор ВВЭР-СКД в закрытом топливном цикле имеет ряд физических особенностей, которые отличают его от реакторов в открытом топливном цикле. Одной из главных особенностей закрытого топливного цикла является использование многократной переработки отработанного топлива. Это позволяет увеличить эффективность использования топлива и сократить количество радиоактивных отходов, которые необходимо хранить на долгие временные промежутки.

Концепция замкнутого топливного цикла предполагает использование уранового и плутониевого топлива, которое после использования в реакторе проходит через перерабатывающие установки для извлечения оставшегося топлива и удаления радиоактивных отходов. Оставшийся плутоний и другие трансурановые элементы могут быть использованы для создания нового топлива.

Реактор ВВЭР-СКД в закрытом топливном цикле имеет ряд физических преимуществ перед реакторами в открытом топливном цикле. Одним из таких преимуществ является увеличение коэффициента размножения нейтронов в реакторе. Это достигается за счет повышенной концентрации плутония-239 в замкнутом топливном цикле, который является более эффективным в поглощении нейтронов, чем уран-238, используемый в открытом топливном цикле.

Закрытый топливный цикл также способствует снижению вероятности распространения радиоактивных материалов. В открытом топливном цикле используется топливо на основе природного урана, который содержит как обедненный уран, так и уран-235. При обогащении урана-235 используется процесс разделения изотопов, который может привести к образованию большого количества отходов, включая обедненный уран и химические соединения урана. В случае использования закрытого топливного цикла, большинство этих отходов могут быть переработаны и повторно использованы в качестве топлива.

Таблица 1.4 – Сравнительная характеристика открытого и закрытого ядерного топливного цикла

Характеристика	Открытый топливный цикл	Закрытый топливный цикл
Тип топлива	Обогащенный уран	Металлический уран-плутониевый
Отходы	Многочисленные и высокоактивные	Отходы меньше в объеме и активности
Использование топлива	Неполное использование топлива, необходима замена после 3-5 лет	Полное использование топлива без необходимости замены в течение 10-20 лет
Расходы	Высокие	Снижены
Эффективность	Низкая	Высокая
Возможность многократной переработки	Отсутствует	Возможна

1.5 Выбор материалов топлива

В настоящее время выбор топлива для ядерных реакторов представляет собой сложный процесс, основанный на различных факторах, таких как безопасность, эффективность, доступность и потенциал для развития реакторов будущего. Рассмотрим несколько типов топлива, включая UO_2 , MOX-топливо и смесь ThO_2+UO_2 .

Ниже приведена таблица, сравнивающая свойства трех различных типов топлива для ядерных реакторов: диоксид урана (UO_2), MOX-топливо и смесь ThO_2+UO_2 . В таблице представлены основные свойства каждого типа топлива.

Для выбора наиболее подходящего топлива для реактора ВВЭР-СКД, необходимо учитывать различные факторы, такие как безопасность, эффективность использования, доступность и экономические аспекты.

Из таблицы 1.5 можно сделать следующие выводы:

Диоксид урана (UO_2) имеет высокую плотность и стойкость к радиационному повреждению. Он широко используется в ядерной энергетике и имеет стандартный процесс производства. Это топливо хорошо

зарекомендовало себя и является стандартным выбором для реакторов ВВЭР-СКД.

Таблица 1.5 – Свойства различных видов топлива

Свойство	Диоксид урана (UO ₂)	МОХ-топливо (20% Pu)	Смесь ThO ₂ +UO ₂ (80% Th)
Химический состав	UO ₂	UO ₂ +PuO ₂	ThO ₂ +UO ₂
Плотность (г/см ³)	10,97	10,4	10,2
Температура плавления (°C)	2860	2800	3350
Теплопроводность (Вт/м·К)	3,5	Варьируется	Варьируется
Стойкость к радиационному повреждению	Высокая	Высокая	Высокая
Степень обогащения U-235	Низкая	Низкая	Высокая
Перспективы развития	Используется широко	Возможны улучшения	Возможны улучшения

МОХ-топливо содержит плутоний и может быть использовано для повышения эффективности использования ядерного топлива. Однако производство и обработка такого топлива сложнее по сравнению с диоксидом урана.

Смесь ThO₂+UO₂ включает торий и также может быть использована для повышения эффективности использования топлива. Однако процесс обогащения и производства данной смеси более сложный.

В настоящее время становится все актуальным вопрос о вовлечении в реакторные установки топлива на основе тория, поэтому стоит разобраться в этом вопросе более подробно, ведь в практической части будет рассмотрен вариант использования не только МОХ-топлива и диоксида урана, но и ThO₂+UO₂ в реакторе ВВЭР-СКД.

Перспективы использования тория в ядерной энергетике привлекают внимание исследователей и инженеров по всему миру. Торий является альтернативным ядерным топливом, которое может предложить ряд преимуществ по сравнению с традиционным топливом на основе урана. Вот некоторые из основных перспектив использования тория в ядерной энергетике:

– большая доступность: торий является одним из самых распространенных тяжелых элементов на Земле. Его запасы значительно превышают запасы урана. Это делает торий более доступным и экономически привлекательным источником ядерного топлива;

– улучшенная безопасность: реакторы на основе тория могут предложить улучшенную безопасность благодаря своим физическим свойствам. Торий является более инертным и стабильным материалом, чем уран. Он обладает высокой температурой плавления и хорошей теплопроводностью, что способствует лучшему управлению тепловым режимом реактора и снижает риск аварийных ситуаций;

– минимальное образование долгоживущих радиоактивных отходов: процесс работы реакторов на основе тория приводит к образованию меньшего количества долгоживущих радиоактивных отходов по сравнению с урановыми реакторами. Это связано с использованием тория в качестве топлива и его способности эффективно преобразовывать радиоактивные изотопы в более стабильные;

– потенциал для закрытого топливного цикла: реакторы на основе тория имеют потенциал для использования в закрытом топливном цикле. Это означает, что они могут быть способными воспроизводить больше топлива, чем они потребляют, и использовать его более эффективно. Такой подход может значительно увеличить энергетическую эффективность и уменьшить количество радиоактивных отходов.

2 Нейтронно-физический расчет

Рассмотрим возможность использования смешанного уран-плутониевого топлива PuO_2+UO_2 (MOX-топлива) в реакторной установке со сверхкритическими параметрами теплоносителя с различным обогащением. Для сравнения приведем расчет нейтронно-физических характеристик с использованием иных топливных композиций, а именно топлива для реакторов типа ВВЭР – диоксида уран (UO_2), и смешанного топлива на основе тория – ThO_2+UO_2 с различным содержанием делящегося материала.

Для выбора наиболее оптимальных значений диаметра ТВЭЛ и топлива проведем оптимизацию параметров реактор ВВЭР-СКД.

На основе выбранных оптимальных параметрах, значениях и характеристиках проведем исследование температурных и плотностных эффектов реактивности с точки зрения безопасности реакторной установки, а также проанализируем размножающие свойства выбранной расчетной модели и исследуем влияние содержания плутония в PuO_2+UO_2 на различные нейтронно-физические характеристики.

2.1 Программный комплекс MCU

Программный комплекс MCU (Monte Carlo Universal) является мощным инструментом для моделирования ядерных реакторов. Он используется для анализа различных параметров реактора, таких как нейтронный поток, концентрация ядерного топлива, тепловые нагрузки и т.д.

Основное преимущество программного комплекса MCU заключается в том, что он использует метод Монте-Карло для моделирования ядерных реакций, который позволяет учитывать множество различных физических процессов, происходящих в реакторе. Более того, этот метод позволяет получать высокоточные результаты, поскольку он учитывает статистические флуктуации в процессах взаимодействия нейтронов с ядрами.

Программный комплекс MSU имеет гибкую структуру, что позволяет использовать его для моделирования различных типов реакторов. В частности, он был успешно применен для моделирования реактора ВВЭР-СКД.

Несмотря на все свои преимущества, MSU также имеет некоторые недостатки, такие как высокие требования к вычислительным ресурсам и длительное время расчетов. Кроме того, в процессе моделирования могут возникать проблемы с сходимостью, которые могут привести к неточности результатов.

Программный комплекс MSU использует метод Монте-Карло для моделирования физических процессов в ядерном реакторе. Этот метод позволяет проводить детальное моделирование каждого из ядерных взаимодействий внутри реактора.

В целом, программный комплекс MSU представляет собой мощный инструмент для моделирования ядерных реакторов, который имеет гибкую структуру, высокую точность результатов и удобный интерфейс пользователя. В связи с этим, MSU является полезным инструментом для научных исследований и инженерных расчетов в области ядерной энергетики.

2.2 Описание расчетной модели

Для проведения расчета приняты следующие геометрические параметры тепловыделяющей сборки (ТВС) реакторной установки со сверхкритическими параметрами теплоносителя (ВВЭР-СКД). В таблице 2.1 приведены основные характеристики реакторной установки.

Проведение нейтронно-физического расчета предполагает вовлечение различных топливных композиций в реакторную установку с различным обогащением топлива по U^{235} , а также оптимизацию размеров ТВЭЛ.

Таблица 2.1 – Проектные параметры РУ ВВЭР-СКД

Параметр	Значение параметра
Тип реактора	ВВЭР-СКД
Тепловая мощность, МВт	3800
Электрическая мощность, МВт	1700
КПД, %	44,3
Материал топлива	Предполагается использование различных топливных композиций (UO ₂ , PuO ₂ +UO ₂ и ThO ₂ +UO ₂)
Плотность топлива, г/см ³	10,95 (UO ₂), 9 (PuO ₂ +UO ₂), 10,97 (ThO ₂ +UO ₂)
Обогащение, %	1%, 5%, 10%, 15%, 19,9%
Теплоноситель-замедлитель	H ₂ O
Давление теплоносителя, МПа	25
Температура теплоносителя, вход/выход, °C	280/530
Материал оболочек ТВЭЛ	Ni - сплав
Размер оболочки ТВЭЛ, мм	∅10,7×0,55
Шаг треугольной решетки ТВЭЛ, мм	12,0
Количество ТВЭЛОВ в ТВС, шт	252
Высота активной зоны, см	376

Изменение радиуса ТВЭЛ приводит к изменению ряда нейтронно-физических характеристик РУ ВВЭР-СКД, а именно к изменению спектра плотности потока нейтронов, его ужесточению – при увеличении радиуса, уменьшению жесткости – при малом значении радиуса ТВЭЛ. В свою очередь данное изменение влияет на величину длительности кампании ядерного топлива, а также на глубину выгорания и запас реактивности.

Расчет производился в программе MCU при различных значениях внешнего диаметра твэл в ТВС, находящейся в центральной зоне РУ ВВЭР-СКД.

На рисунке 2.1 представлена расчетная модель активной зоны реакторной установки со сверхкритическими параметрами теплоносителя (с центральной и периферийной зонами), что обеспечивает двухзаходную схему течения теплоносителя.

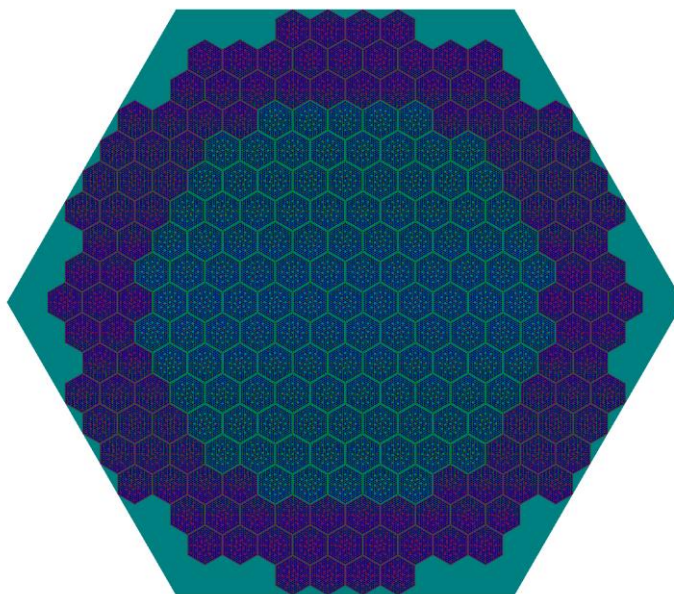


Рисунок 2.1 – Расчетная модель активной зоны РУ ВВЭР-СКД

В расчетной модели активной зоны центральная и периферийная зоны по высоте разбивались на 4 подзоны, которые отличались своими средними значениями плотности и температуры теплоносителя, оболочек твэл и выбранного топлива (таблица 2.2).

В данной работе производился расчет только ТВС, расположенной в центральной части активной зоны РУ ВВЭР-СКД.

На рисунке 2.2 представлена расчетная модель ТВС РУ ВВЭР-СКД.

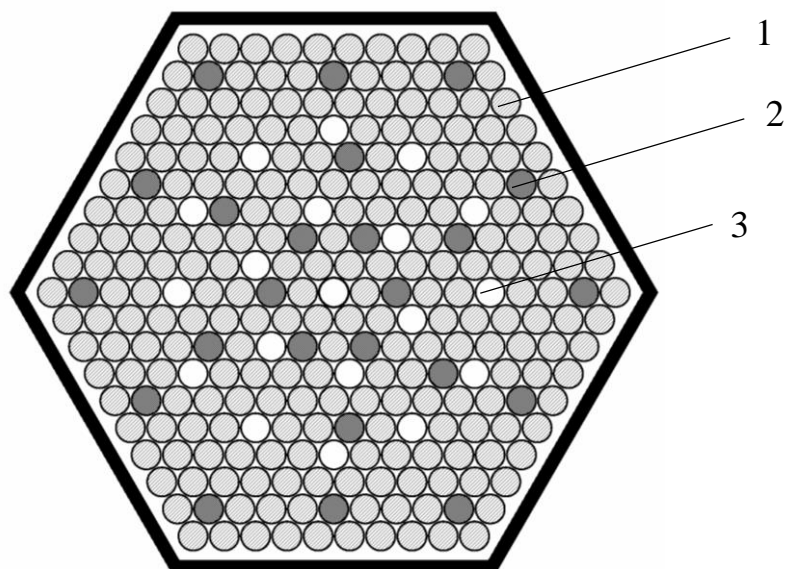


Рисунок 2.2 – Модель ТВС ВВЭР-СКД со стандартным диаметром твэл:
1 – твэл, 2 – твердый замедлитель (гидрид циркония), 3 – канал под В₄С

Таблица 2.2 – Изменение теплогидравлических параметров по высоте

Расстояние от низа активной зоны, см	Плотность теплоносителя, г/см ³	Температура, °С		
		Теплоноситель	Оболочка	Топливо
Периферийная зона				
94	0,3	388	405	990
188	0,45	370	385	860
282	0,68	340	352	720
376	0,76	290	300	600
Центральная зона				
94	0,2	403	430	1600
188	0,15	420	465	1650
282	0,12	450	530	1700
376	0,095	513	575	1680

Для того, чтобы оценить влияние изменения радиуса твэл на различные нейтронно-физические характеристики, были разработаны еще несколько расчетных моделей, которые в дальнейшем использовались для проведения расчетов в программе MCU с вовлечением различных топливных композиций (рисунок 2.3).

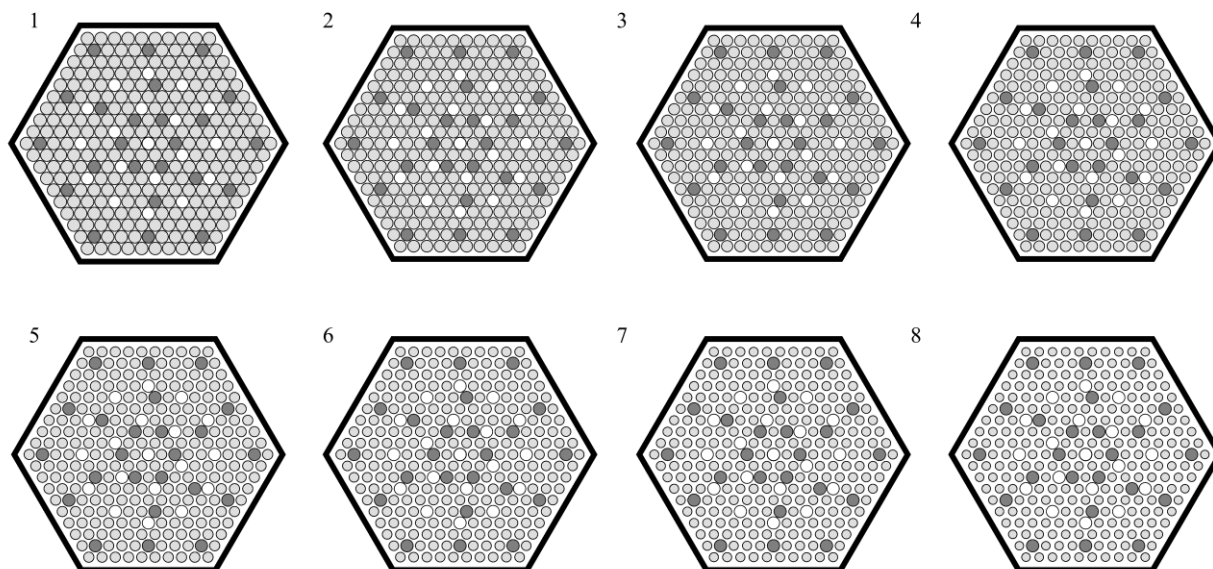


Рисунок 2.3 – Модели ТВС для расчета с различным диаметром твэл:
 1 – 1,07 см, 2 – 1,02 см, 3 – 0,97 см, 4 – 0,92 см, 5 – 0,87 см, 6 – 0,82 см,
 7 – 0,77 см, 8 – 0,72 см

2.3 Исследование различных топливных композиций в ТВС реактора типа ВВЭР-СКД

В данной работе проведен анализ зависимости радиуса для различных топливных композиций и обогащения от длительности кампании ядерного топлива, средней глубины выгорания, а также запаса реактивности.

Проводя анализ полученных зависимостей, можно заметить, что при изменении параметров твэл происходит существенное изменение нейтронно-физических характеристик ТВС реактора ВВЭР-СКД, находящейся в центральной зоне, поэтому для более точной оценки предлагается провести оптимизацию внешнего диаметра твэл для выбранных топливных композиций (UO_2 , PuO_2+UO_2 и ThO_2+UO_2).

На рисунке 2.4 – 2.14 представлены графики сравнения начального запаса реактивности, длины кампании и глубины выгорания для выбранных топливных композиций с различным содержанием делящегося материала.

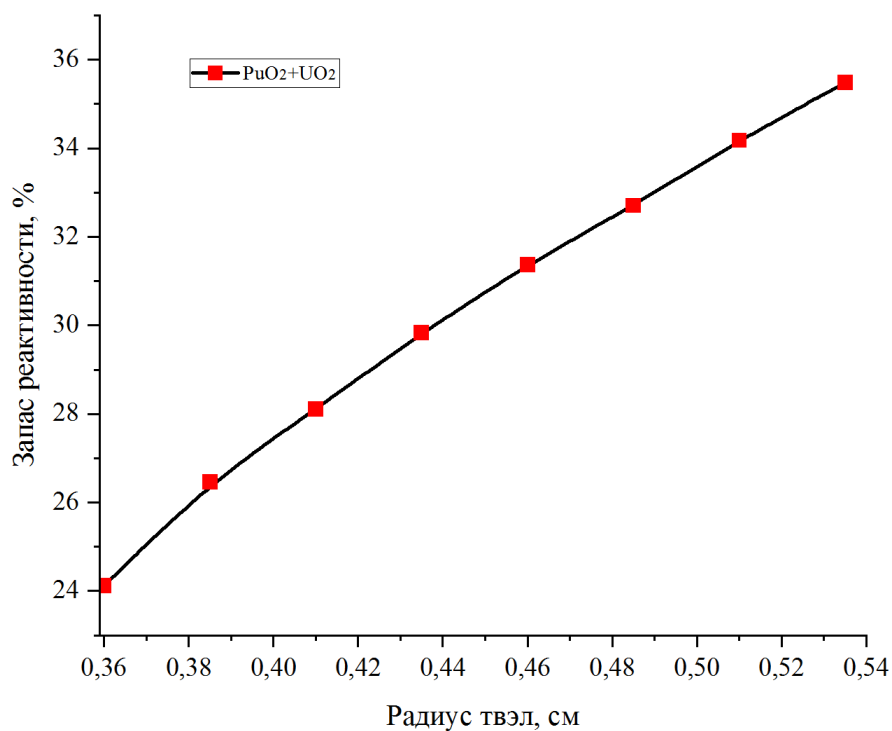


Рисунок 2.4 – Зависимость запаса реактивности от радиуса твэл с 1% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

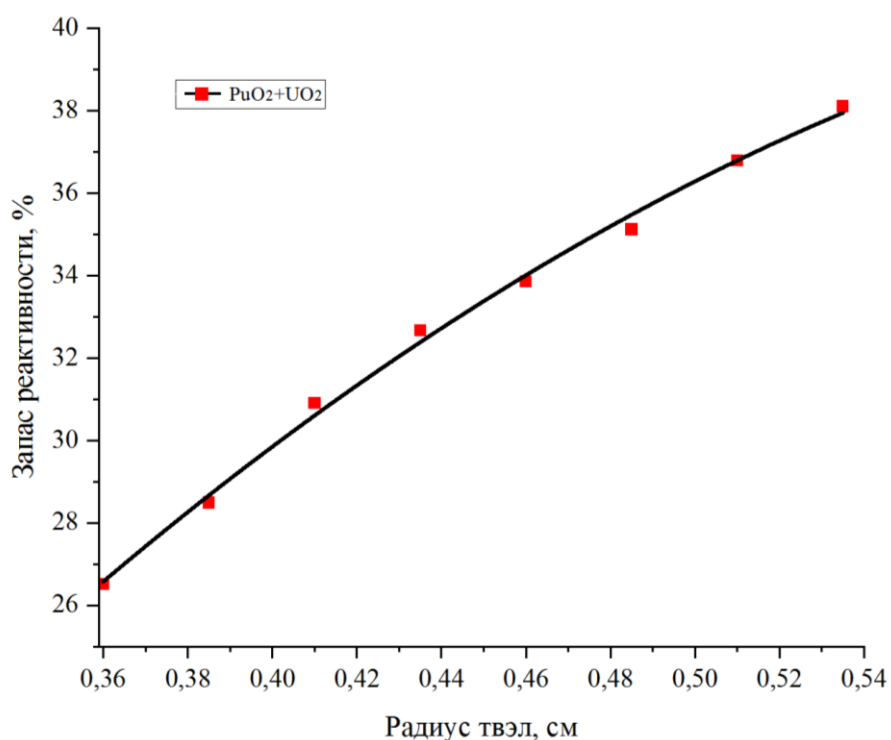


Рисунок 2.5 – Зависимость запаса реактивности от радиуса твэл с 5% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

Анализируя графики 2.4 – 2.7, можно заметить, что при обогащении 1% и 5% начальный запас реактивности имеет лишь топливная композиция с плутонием, остальные же виды топлива не выполняют условия, при котором $k_{эфф} \geq 1$, и следовательно не могут принимать участия в цепной реакции деления. Тогда для вовлечения UO_2 и ThO_2+UO_2 необходимо более высокое значение содержания делящегося материала.

Что касается топливной композиции PuO_2+UO_2 , то можно увидеть, что как с 1%, так с 5% содержанием делящегося материала обеспечивается достаточно высокая глубина выгорания топлива, чему свидетельствует длительность кампании в 10000 суток.

Смешанное уран-плутониевое топливо с низким обогащением и вовлечением его в ТВС реактора ВВЭР-СКД может быть пригодным для данной реакторной установки.

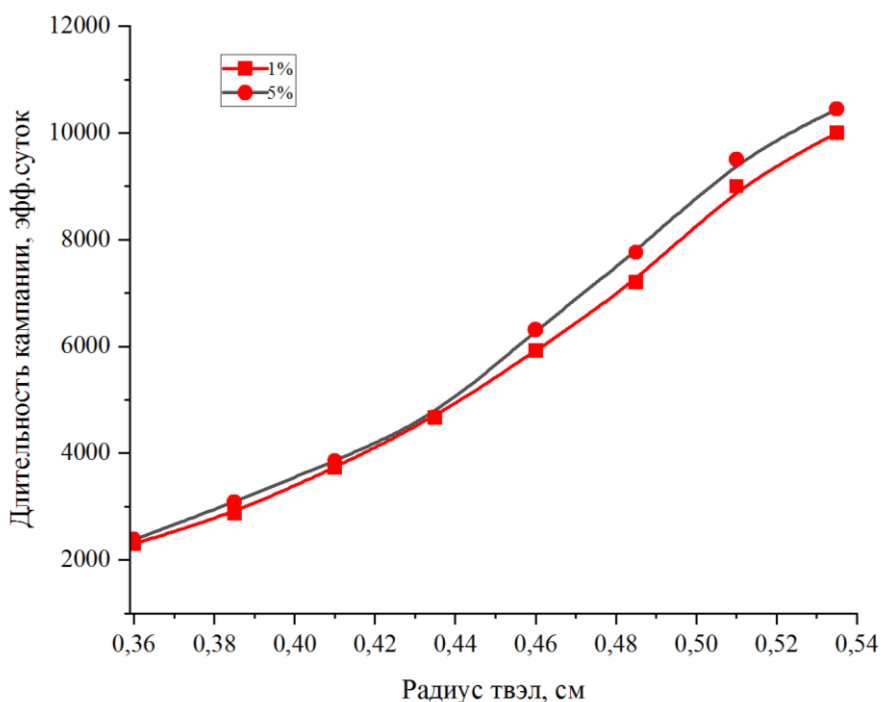


Рисунок 2.6 – Зависимость длительности кампании от радиуса ТВЭЛ с 1% и 5% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

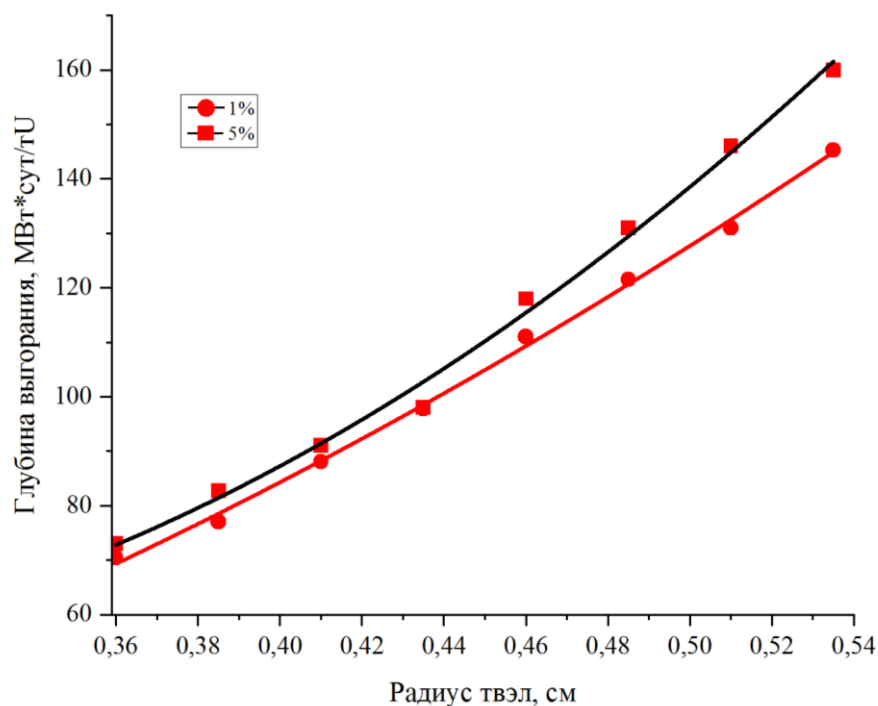


Рисунок 2.7 – Зависимость глубины выгорания от радиуса твэл с 1% и 5% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

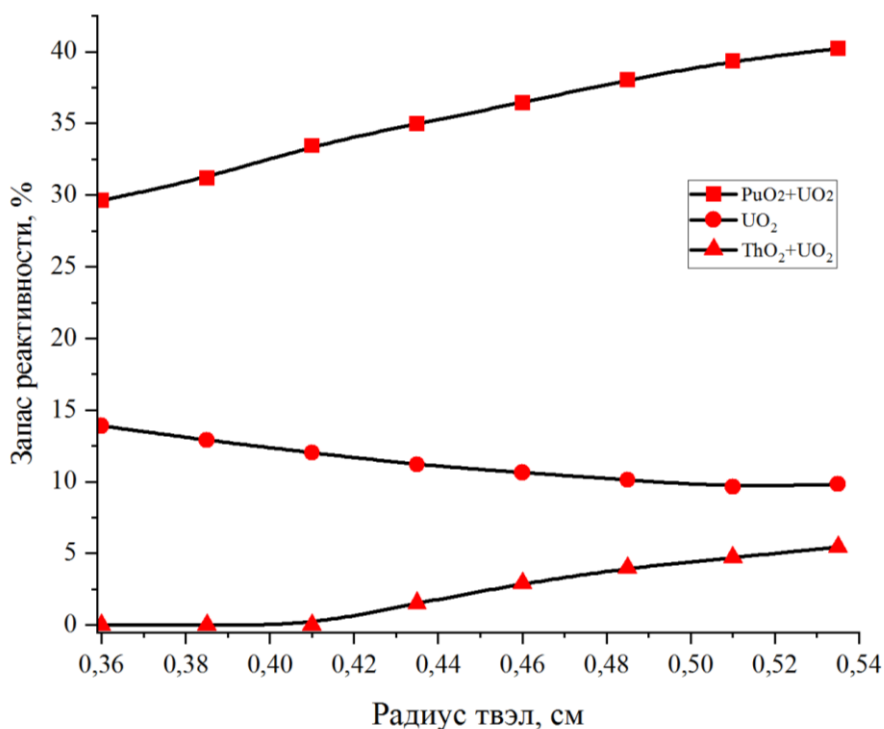


Рисунок 2.8 – Зависимость запаса реактивности от радиуса твэл с 10% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

Из графика 2.8 видно, что наибольшее значение запаса реактивности имеет топливная композиция с плутонием при радиусе 0,535 см (проектное значение реактора ВВЭР-СКД), с уменьшением радиуса также уменьшается начальный запас реактивности, длина кампании и глубина выгорания. Наибольшее значение длины кампании соответствует величине равной 11000 суток.

Топливная композиция представленная в виде UO_2 имеет относительно иные нейтронно-физические характеристики. С ростом радиуса твэл уменьшается начальный запас реактивности до 10%, который при радиусе 0,36 см принимает свое максимальное значение порядка 14%. Максимальная глубина выгорания принимает значение 64 МВт·сут/тU при радиусе твэл 0,535 см.

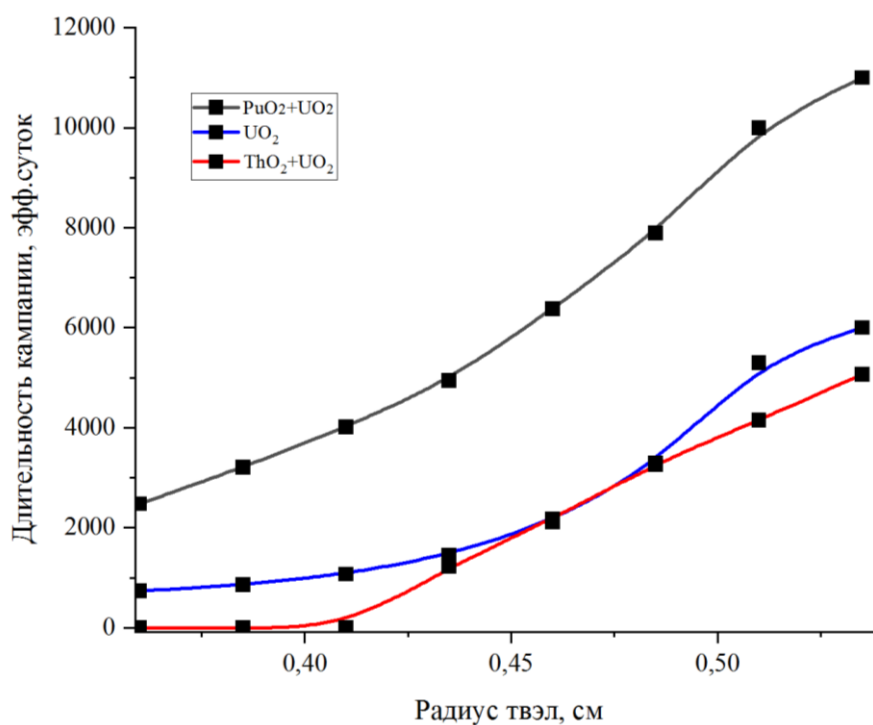


Рисунок 2.9 – Зависимость длительности кампании от радиуса твэл с 10% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

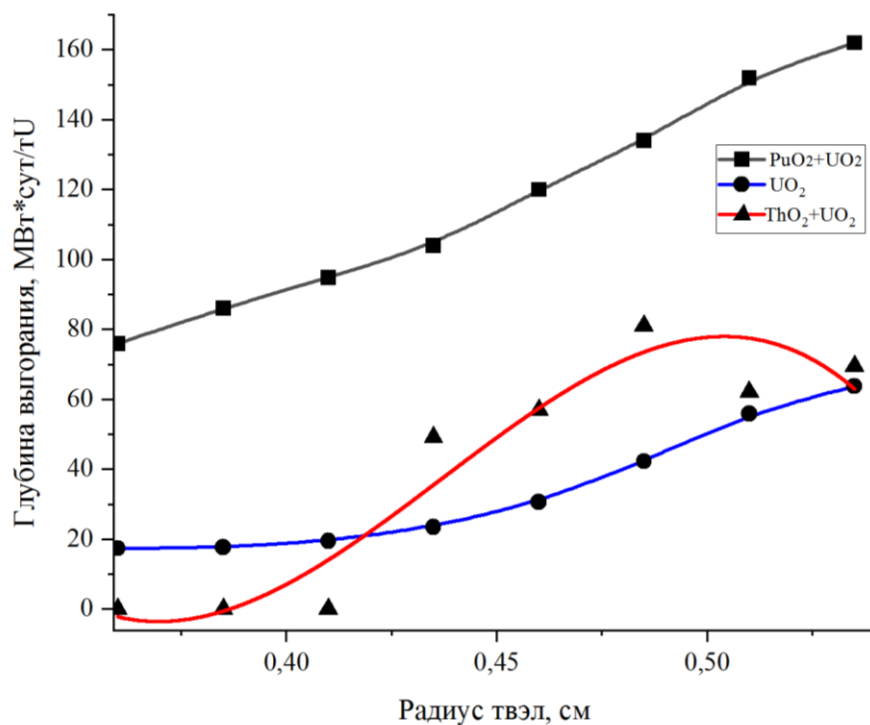


Рисунок 2.10 – Зависимость глубины выгорания от радиуса ТВЭЛ с 10% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральной зоне РУ ВВЭР-СКД

На графиках 2.8 – 2.10 можно увидеть, что в топливной композиции на основе тория при радиусе 0,36 см, 0,385 см и 0,41 см отсутствует начальный запас реактивности, а при более высоких значениях радиуса ТВЭЛ он имеет сравнительно небольшие значения. Низкая величина запаса реактивности в начале кампании при использовании в качестве ядерного топлива ThO_2+UO_2 может быть обусловлена возможностью непрерывной дозированной добавки топлива, а также его очистки в процессе эксплуатации от осколочных элементов поглотителей нейтронов [16].

Также стоит заметить, что топливная композиции на основе тория с 10% содержанием делящегося материала имеет наименьшую длительность кампании в сравнении с UO_2 и PuO_2+UO_2 и составляет величину равную 5070 суток, при которой достигается глубина выгорания порядка 70 МВт.сут/тU.

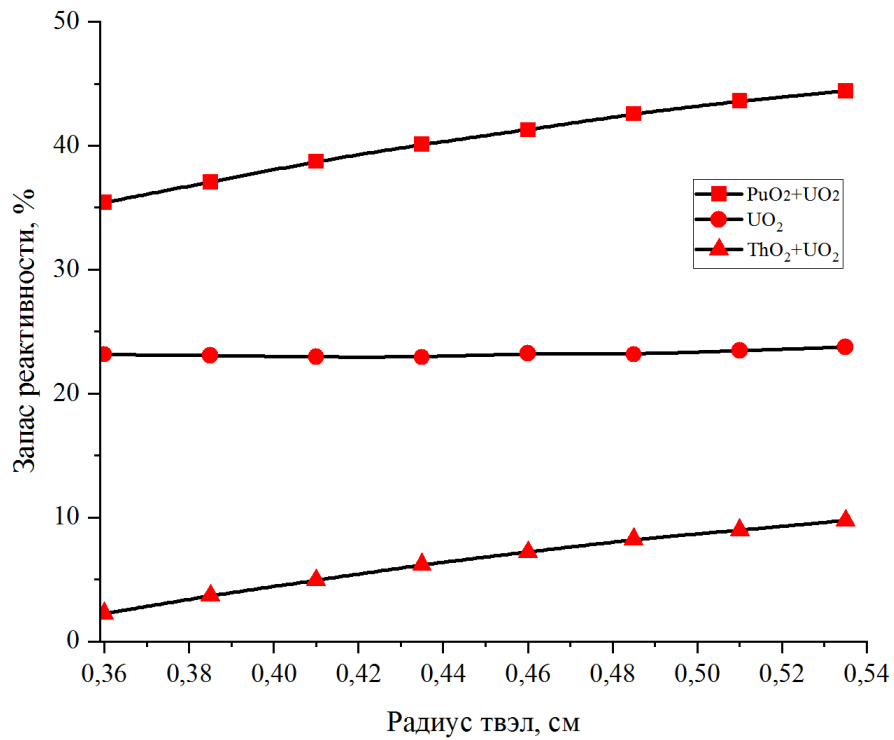


Рисунок 2.11 – Зависимость запаса реактивности от радиуса твэл с 15% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

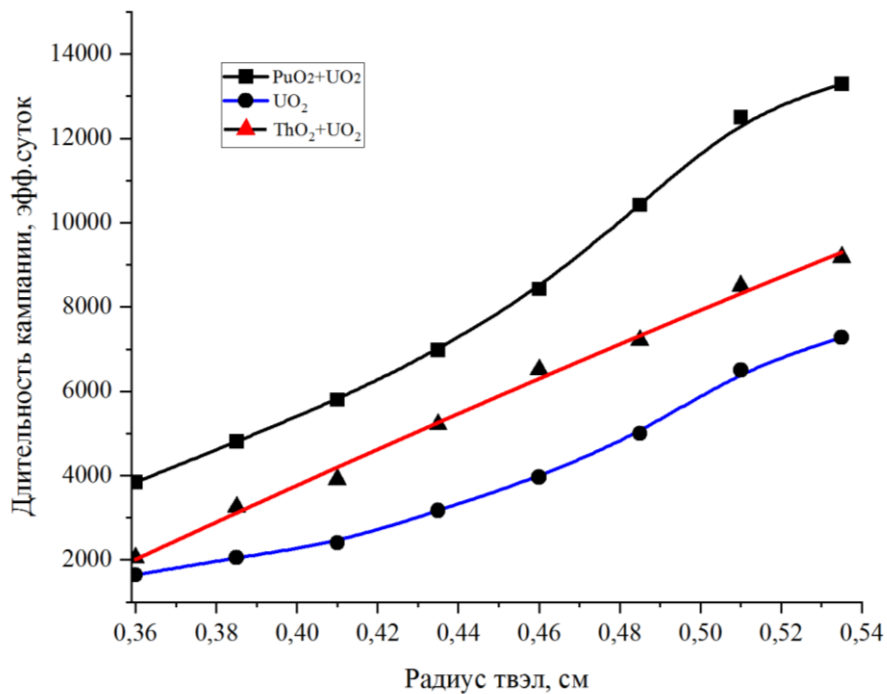


Рисунок 2.12 – Зависимость длительности кампании от радиуса твэл с 15% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

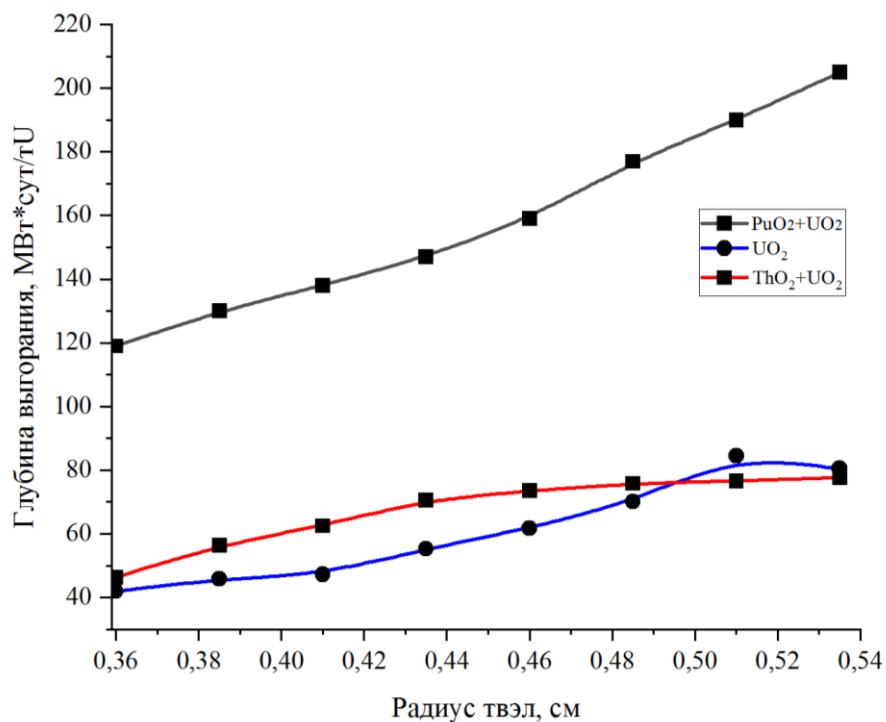


Рисунок 2.13 – Зависимость глубины выгорания от радиуса ТВЭЛ с 15% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

Из графиков 2.11 – 2.13 видно, что наибольшая длина кампании, равная 13300 суток при радиусе 0,535 см, соответствует топливной композиции с плутонием, которая в свою очередь обеспечивает наибольший запас реактивности и глубину выгорания при проектных значениях реактора ВВЭР-СКД.

Из графика 2.12 можно увидеть, что при увеличении обогащения до 15% происходит заметное увеличение длительности кампании смешанного уран-ториевого ядерного топлива на 4000 суток, что в свою очередь увеличивает начальный запас реактивности до величины порядка 10%.

Что касается топливной композиции с диоксидом урана, то можно заметить из графика зависимости начального запаса реактивности от радиуса ТВЭЛ, что с ростом параметров тепловыделяющего элемента начальный запас реактивности изменяется слабо и в среднем составляет значение около 23%, что соответствует наименьшей длине кампании среди представленных топливных композиций и составляет величину 7280 суток.

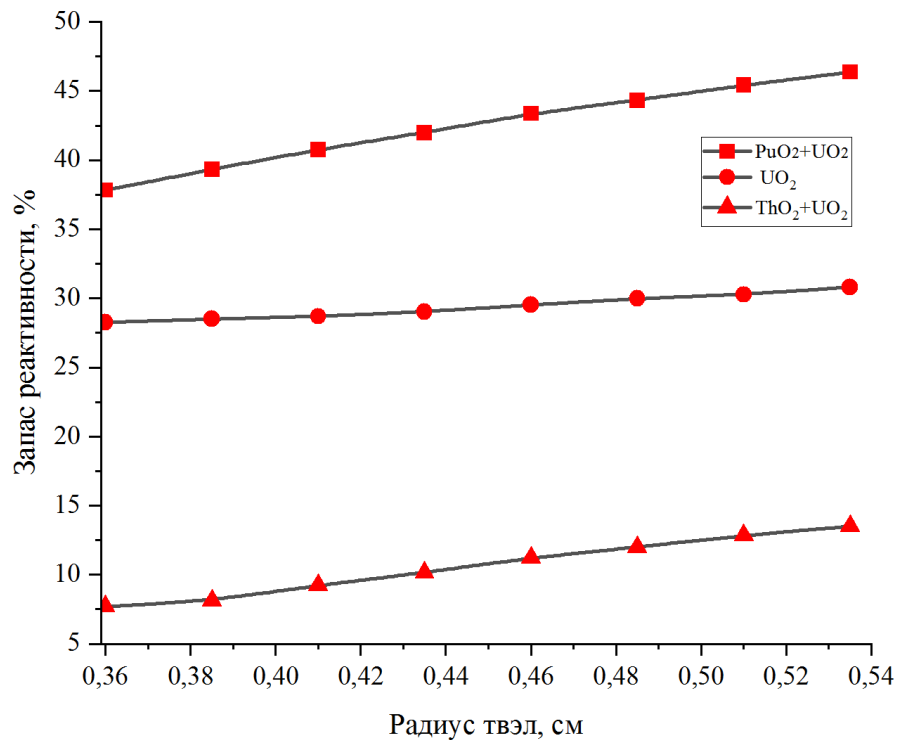


Рисунок 2.14 – Зависимость запаса реактивности от радиуса ТВЭЛ с 19,9% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

На рисунках 2.14 – 2.16 представлены графики для топлива с 19,9% обогащением. Проводя анализ представленных зависимостей, можно сказать, что наибольший запас реактивности и глубину выгорания также имеет топливная композиция с плутонием при радиусе 0,535 см, длину кампании – топливо ThO₂+UO₂, что составляет величину 15390 суток и соответствует такому понятию как сверхдлинная кампания ядерного топлива. Как уже отмечалось ранее: для топливной композиции с торием характерно невысокое значение начального запаса реактивности, что оказывает благоприятное воздействие на безопасность реакторной установки. Также для вовлечения ThO₂+UO₂ необходимо достаточно высокое содержание делящегося материала, чтобы обеспечивать устойчивую работу при проектных значениях реактора ВВЭР-СКД.

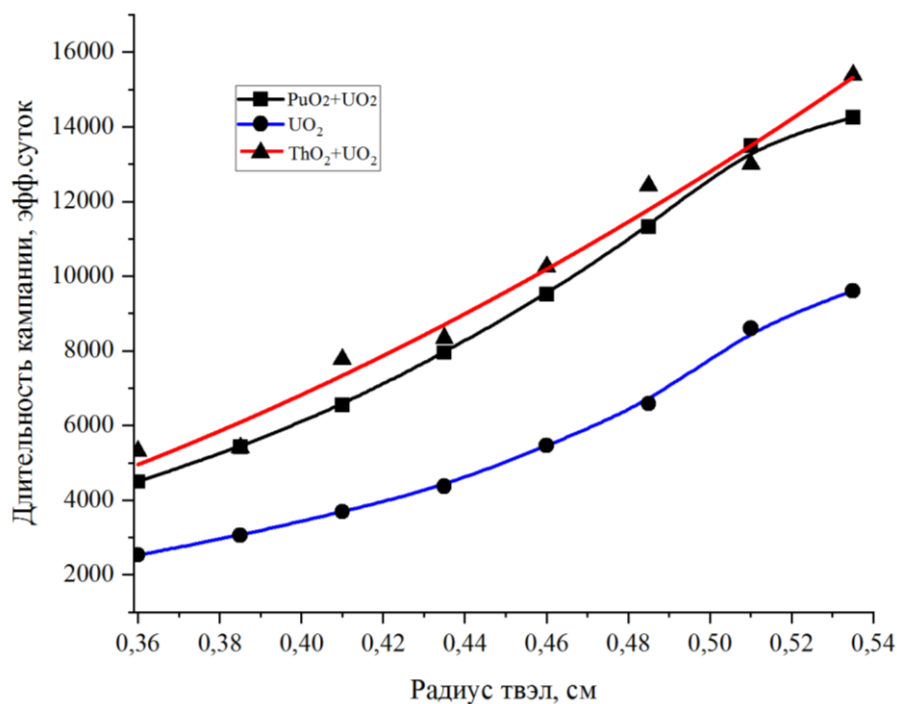


Рисунок 2.15 – Зависимость длительности кампании от радиуса твэл с 19,9% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

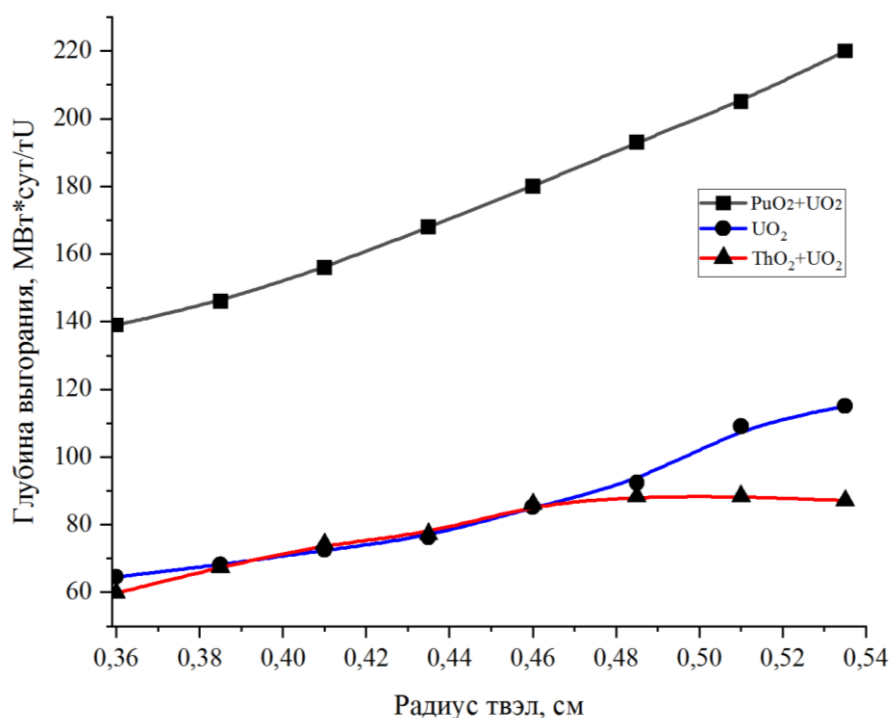


Рисунок 2.16 – Зависимость глубины выгорания от радиуса твэл с 19,9% содержанием делящихся нуклидов в ТВС, расположенной в центральное зоне РУ ВВЭР-СКД

2.4 Исследование эффектов реактивности

Исследуя различные топливные композиции, можно сделать вывод, что одной из самых оптимальных с точки зрения размножающих свойств и безопасности является PuO_2+UO_2 . Также стоит отметить, что, используя данный вид ядерного топлива, можно не прибегать к обогащению или же использовать топливо с низким содержанием делящегося материала.

Для того, чтобы убедиться в целесообразности использования в реакторе типа ВВЭР-СКД смешанного уран-плутониевого топлива (МОХ-топлива), необходимо исследовать различные эффекты, и проанализировать размножающие свойства ТВС, расположенной в центральной части активной зоны реакторной установки.

Для начала следует определить температурный и плотностной эффекты реактивности. Расчет будет проводиться с помощью программы MSU, расчетной моделью также будет являться ТВС, расположенная в центральной части активной зоны реактора ВВЭР-СКД. Исследуемая топливная композиция представлена в виде PuO_2+UO_2 с 1% содержанием делящегося материала.

На рисунке 2.17 представлена зависимость изменения реактивности от температуры топлива.

Температурным эффектом реактивности реактора (ТЭР) при рассматриваемой средней температуре теплоносителя в активной зоне называется величина изменения реактивности реактора при его разогреве от 20 °С до этой температуры [16].

Температурный коэффициент реактивности реактора при данной средней температуре теплоносителя – это изменение реактивности реактора при его разогреве на 1 °С сверх этой температуры [16].

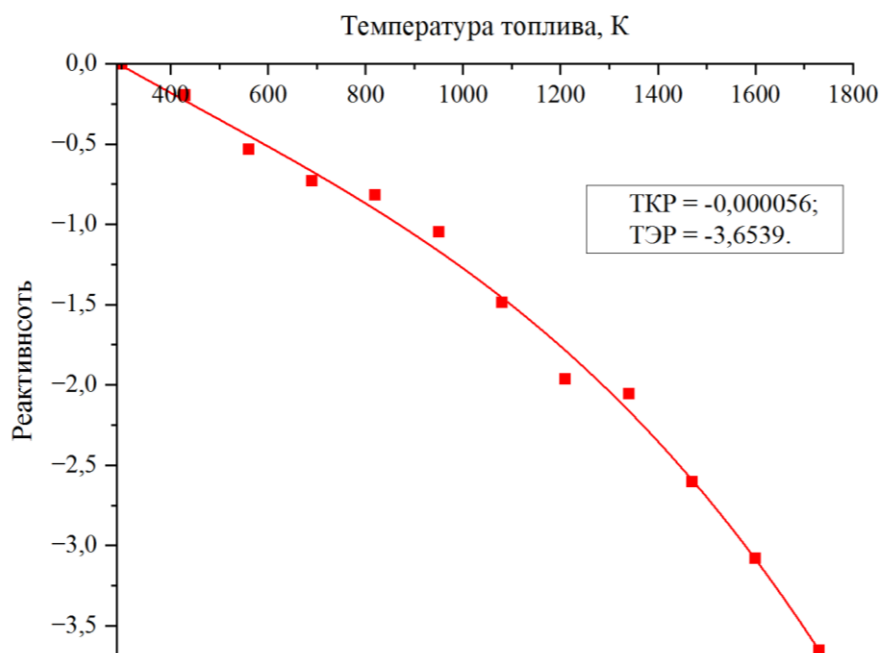


Рисунок 2.17 – Температурный эффект реактивности по топливу

В таблице 2.3 представлены данные, полученные в ходе моделирования ТВС, находящейся в центральной части активной зоны реактора типа ВВЭР-СКД при изменении температуры топлива от 300 К до 1730 К.

Таблица 2.3 – Результаты исследования температурного эффекта реактивности по топливу при изменении температуры от 300 К до 1730 К.

$T_{\text{fuel}}, \text{ К}$	K_{eff}	$\rho, \%$	Изменение реактивности
300	1,5144	33,9697	0
430	1,5099	33,7739	-0,1958
560	1,5023	33,4359	-0,5338
690	1,4978	33,2398	-0,7299
820	1,4959	33,1521	-0,8175
950	1,4908	32,9240	-1,0457
1080	1,4811	32,4839	-1,4858
1210	1,4707	32,0072	-1,9625
1340	1,4687	31,9134	-2,0563
1470	1,4570	31,3672	-2,6025
1600	1,4469	30,8892	-3,0805
1730	1,4350	30,3158	-3,6539

ТЭР по топливу при изменении температуры с 300 К до 1730 К составляет -3,6539 %. ТКР равен -0,000056.

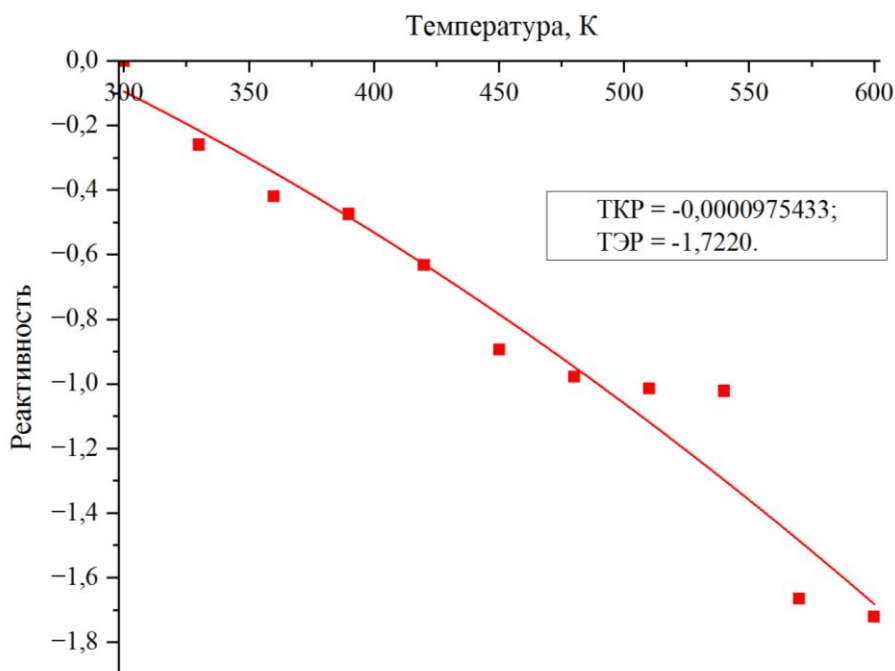


Рисунок 2.18 – Температурный эффект реактивности по замедлителю

ТЭР по замедлителю при изменении температуры с 300 К до 600 К составляет -1,7220 %. ТКР равен -0,0000975. На рисунке 2.18 изображена зависимость ρ от T .

Таблица 2.4 – Результаты исследования температурного эффекта реактивности по замедлителю при изменении температуры от 300 К до 600 К.

T_3 , К	K_{eff}	ρ , %	Изменение реактивности
300	1,3183	24,1461	0
330	1,3138	23,8867	-0,2593
360	1,3111	23,7263	-0,4197
390	1,3101	23,6716	-0,4744
420	1,3074	23,5133	-0,6328
450	1,3030	23,2513	-0,8947
480	1,3016	23,1682	-0,9778
510	1,3009	23,1318	-1,0142
540	1,3008	23,1240	-1,0220
570	1,2900	22,4810	-1,6650
600	1,2891	22,4241	-1,7220

В таблице 2.4 представлены результаты изменения реактивности в результате изменения температуры замедлителя от 300 К до 600 К.

Отрицательные значения данных величин свидетельствуют о возможности устойчивой работы реактора.

2.5 Исследование размножающих свойств ТВС ВВЭР-СКД

В программе MCU был произведен расчет горячего состояния реактора с использованием PuO_2+UO_2 с 1% содержанием делящегося материала.

Реактор ВВЭР-СКД относится к реакторам с быстро-резонансным спектром нейтронов. Так как конструкция реактора предполагает увеличенный диаметр ТВЭЛ по сравнению с серийными реакторами типа ВВЭР-1000, то можно говорить об ужесточении спектра нейтронов и смещении спектра в область более высоких энергий (рисунок 2.19).

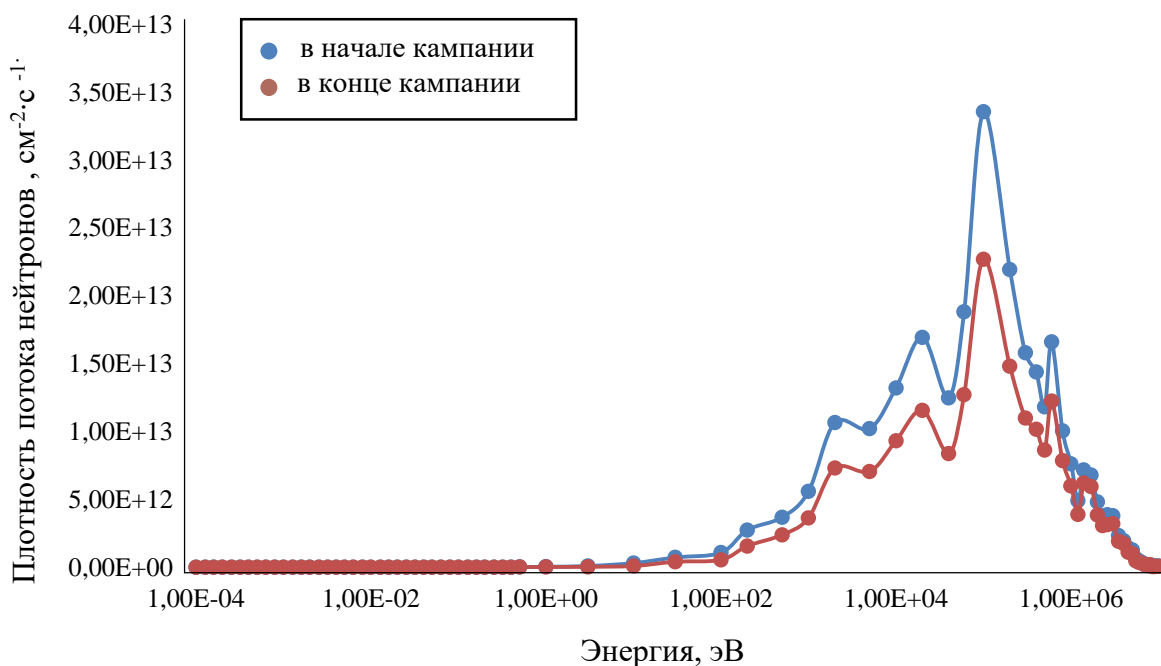


Рисунок 2.19 – Спектр плотности потока нейтронов в начале и конце кампании

Для топливной композиции PuO_2+UO_2 с обогащением 1% длина кампании топлива составляет порядка 10000 суток.

В процессе работы реактора протекают различные процессы, связанные с изменением нуклидного состава. На рисунках 2.21 – 2.22 изображены зависимости изменения концентрации с течением кампании ядерного топлива для различных изотопов плутония и U^{235} .

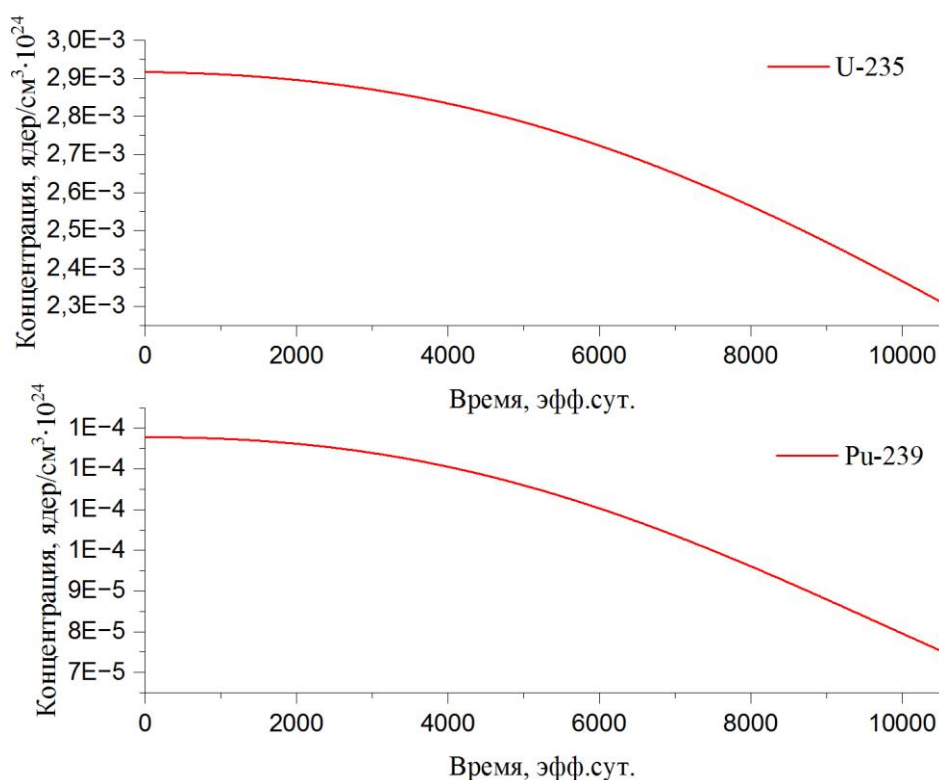


Рисунок 2.21 – Динамика изменения концентрации ядер U^{235} и Pu^{239}

На графике 2.21 представлена зависимость концентрации изотопа U^{235} от времени в течение выгорания топлива в ТВС реактора ВВЭР-СКД с МОХ-топливом и 1% обогащением по U^{235} . Как видно из графика, концентрация U^{235} убывает по мере выгорания топлива. Зависимость имеет нелинейный характер, что обусловлено изменением плотности потока нейтронов и другими факторами, влияющими на процесс выгорания топлива.

В процессе работы реактора происходит выгорание топлива, и концентрация Pu^{239} убывает не линейно, что отражает зависимость, полученная в результате моделирования на графике 2.21.

При взаимодействии нейтронов с ядрами U^{235} в топливе происходит деление ядер и высвобождение энергии. Однако в процессе такого взаимодействия ядер могут образовываться и другие, например, Pu^{239} . Плутоний-239 также является ядром, которое может делиться и высвобождать энергию, поэтому его содержание в топливе является полезным для реактора.

Однако, в процессе работы реактора Pu^{239} также может быть превращен в другие ядра или вовсе выйти из топлива в виде продуктов деления или через процессы активации в реакторе. Это приводит к уменьшению концентрации Pu^{239} в топливе реактора со временем, что и отображено на графике.

График 2.22 показывает зависимость концентрации Pu^{241} от времени в реакторе ВВЭР-СКД. Зависимость носит убывающий характер, причем нелинейный, что говорит о том, что выгорание Pu^{241} происходит быстрее в начале эксплуатации реактора и замедляется со временем. Это объясняется тем, что Pu^{241} образуется в процессе распада Pu^{239} , который является основным источником плутония в топливе. С уменьшением концентрации Pu^{239} в топливе уменьшается и скорость образования Pu^{241} , что приводит к уменьшению его концентрации в реакторе.

Физический смысл зависимостей, полученных в ходе моделирования, заключается в изменении изотопного состава плутония в ядерном топливе в процессе выгорания. Увеличение концентрации Pu^{240} может снизить эффективность работы реактора. Кроме того, Pu^{240} является источником гамма-излучения, что может повысить радиационные нагрузки на оборудование реактора и требования по радиационной защите. Таким образом, контроль и оптимизация изотопного состава плутония в ядерном топливе являются важными факторами для обеспечения безопасной и эффективной работы реакторов.

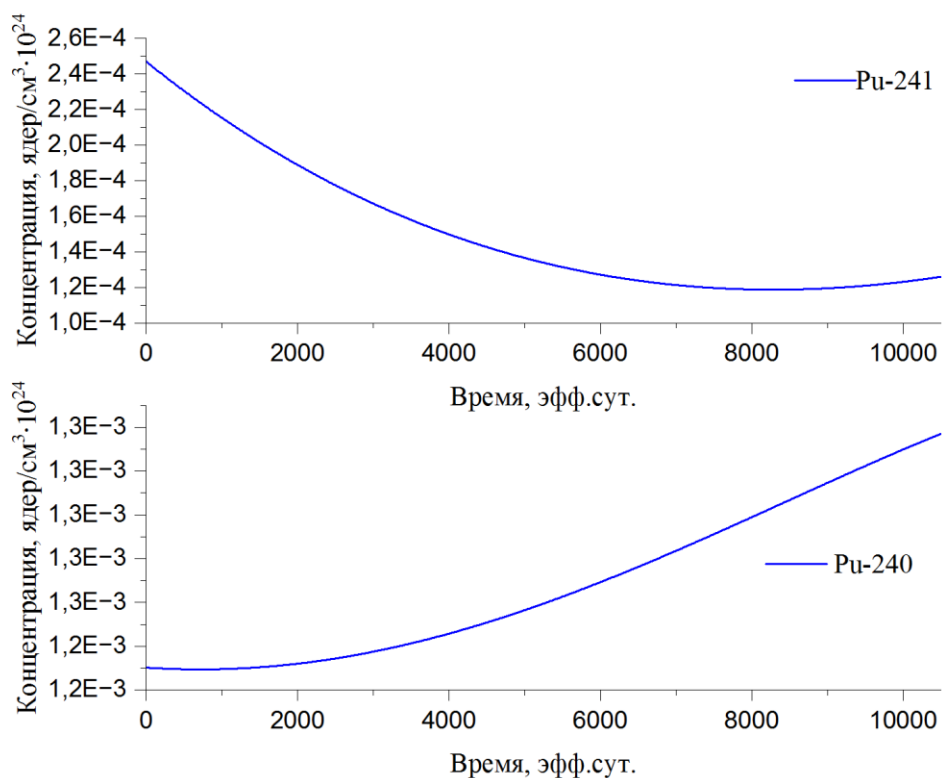


Рисунок 2.22 – Динамика изменения концентрации ядер изотопов плутония

2.6 Исследование влияния содержания плутония в МОХ-топливе на нейтронно-физические характеристики реактора типа ВВЭР-СКД

Для того, чтобы убедиться в безопасности и целесообразности использования смешанного уран-плутониевого топлива необходимо исследовать, как влияет содержание плутония в смеси на различные нейтронно-физические характеристики.

Таблица 2.5 – Изотопный состав плутония

Изотопы плутония	Содержание, %
Pu-238	2,58
Pu-239	58,47
Pu-240	26,45
Pu-241	5,53
Pu-242	6,97

Для того, чтобы проводить моделирование и анализ необходимо определить изотопный состав плутония в оксиде PuO₂ (таблица 2.5).

Для данного изотопного состава плутония определена эквивалентная плотность 9 г/см³.

Расчетной моделью будет являться ТВС, находящаяся в центральной части активной зоны реактора типа ВВЭР-СКД (топливная композиция – PuO₂+UO₂ с 1% содержанием делящегося материала).

Таблица 2.6 – Содержание различных изотопов плутония в смеси PuO₂+UO₂

Содержание Pu-239, %	Изотопы плутония	Содержание, доли
1	Pu-238	0,0004
	Pu-240	0,0045
	Pu-241	0,0009
	Pu-242	0,0012
5	Pu-238	0,0022
	Pu-240	0,0225
	Pu-241	0,0047
	Pu-242	0,0059
6	Pu-238	0,0026
	Pu-240	0,0270
	Pu-241	0,0057
	Pu-242	0,0071
7	Pu-238	0,0030
	Pu-240	0,0315
	Pu-241	0,0066
	Pu-242	0,0083
8	Pu-238	0,0035
	Pu-240	0,0360
	Pu-241	0,0075
	Pu-242	0,0095
9	Pu-238	0,0040
	Pu-240	0,0406
	Pu-241	0,0085
	Pu-242	0,0106
10	Pu-238	0,0044
	Pu-240	0,0451
	Pu-241	0,0094
	Pu-242	0,0119

Исследование будет проводиться с изменением концентрации Pu-239 с 1%, 5-10% содержанием данного изотопа в смеси PuO₂+UO₂.

В таблице 2.6 представлено содержание изотопов плутония в смеси PuO_2+UO_2 в зависимости от концентрации Pu-239.

На рисунке 2.23 представлена зависимость изменения запаса реактивности от длительности кампании ядерного топлива с различным содержанием плутония в смеси PuO_2+UO_2 .

Проводя анализ представленных (рисунок 2.23) зависимостей можно сделать вывод, что при увеличении концентрации плутония в смеси закономерно увеличивается запас реактивности, длительность кампании и глубина выгорания (таблица 2.7).

Стоит отметить, что с 1% содержанием плутония в смеси не достигается приемлемое значение k_{eff} , следовательно, можно положить, что с таким изотопным составом ЦРД идти не может в представленной расчетной модели. Таблица 2.7 – Нейтронно-физические характеристики ТВС реактора типа ВВЭР-СКД с различным содержанием плутония

Содержание плутония, %	Длительность кампании, эфф. сут.	Глубина выгорания, МВт*сут/ТУ	Запас реактивности, %
1	Недостаточное содержание плутония		
5	4900	68	0,54
6	5600	77	7,59
7	6067	84	12,83
8	6533	90	16,52
9	7000	97	20,47
10	7700	106	23,65
15	9660	134	34,15
20	13090	181	40,52

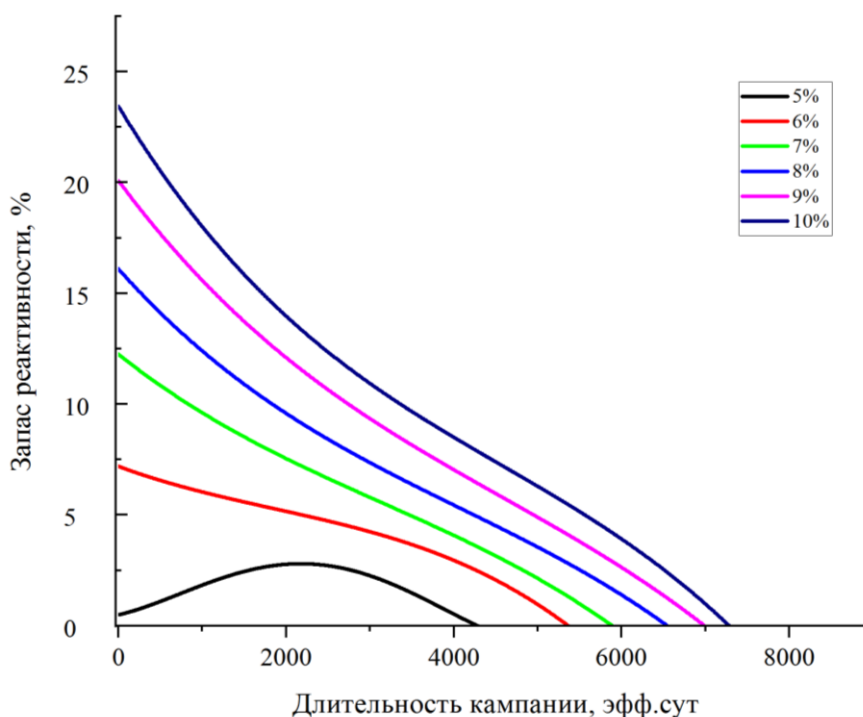


Рисунок 2.23 – Изменение запаса реактивности с течением кампании ядерного топлива с различным содержанием плутония в смеси PuO_2+UO_2

Топливная композиция с 5% содержанием плутония имеет достаточно низкое значение запаса реактивности 0,52%, что соответствует безопасности реакторной установки и устойчивой работе в процессе эксплуатации. Также для данной композиции характерно достаточно высокое значение глубины выгорания и сверхдлинная кампания ядерного топлива, которая составляет величину порядка 5000 суток. В рамках данной топливной композиции можно рассмотреть вариант замыкания ядерного топливного цикла.

Для топлива с содержанием плутония от 6-10% происходит рост запаса реактивности и соответствующих величин, представленных в таблице 2.7.

Для сравнения в таблице 2.7 также были приведены значения величин длительности кампании, глубины выгорания и запаса реактивности для топлива с 15% и 20% содержанием плутония. По полученным данным можно сделать вывод, что для осуществления безопасной и устойчивой работы реактора типа ВВЭР-СКД не обязательно иметь высокое содержание плутония в смеси PuO_2+UO_2 .

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка перспективности проведения научного исследования;
- разработка экономической идеи проекта и формирование его концепции;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценка перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В данной работе проведен расчет нейтронно-физических характеристик тепловыделяющей сборки (ТВС) центральной и периферийной зоны реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя (ВВЭР-СКД) с различными видами топливных композиций с использованием программного комплекса MSU.

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок.

В ходе выполнения данной работы была разработана расчетная модель ТВС с использованием ее в центральной зоне реактора ВВЭР-СКД с загрузкой различных топливных композиций в виде ядерного топлива, а также определены нейтронно-физические характеристики тепловыделяющих сборок данного типа ядерного реактора.

Результатом исследования стала оценка условий сохранения характеристик безопасности РУ ВВЭР-СКД, в том числе выполнение отрицательного температурного эффекта и коэффициента реактивности. А также результатом исследования являются полученные значения начального запаса реактивности, глубины выгорания и длины кампании ядерного топлива с вовлечением различных топливных композиций и сравнением их между собой.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, а также различные смежные научные отрасли.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данных расчетов. Результаты сегментирования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Карта сегментирования рынка ЯППУ

		Реакторная установка со сверхкритическими параметрами теплоносителя	
		Атомная промышленность	Научно-исследовательские институты
Потребность	Сильная		
	Слабая		

По итогам составления карты сегментирования Российского рынка ЯППУ следует, что как в атомной промышленности, так и научно-

исследовательских институтах необходимы проведенные расчеты по реакторным установкам со сверхкритическими параметрами теплоносителя. Это свидетельствует о значительной потребности в разработке и изучении таких реакторов в сфере атомной энергетики и научных исследований.

Однако разработка и исследование таких реакторов требует проведения множества расчетов и экспериментов, чтобы определить оптимальные параметры и обеспечить безопасность эксплуатации. Таким образом, потребность в проведенных расчетах по реакторным установкам со сверхкритическими параметрами теплоносителя является высокой как в сфере атомной энергетики, так и в научных исследованиях.

3.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Цель анализа – определить оптимальную топливную композицию для нейтронно-физического расчета РУ ВВЭР-СКД с использованием программы MSU.

Главное задачей расчета будет получение параметров, при которых будет происходить выгорание топлива в ТВС. Расчетная модель будет демонстрировать, как изменятся финансовые затраты на реализацию проекта с заменой топлива PuO_2+UO_2 на UO_2 и ThO_2+UO_2 . Основными конкурентами в представленном расчете являются:

- урановое ядерное топливо UO_2 ;
- смешанное уран-ториевое ядерное топливо ThO_2+UO_2 .

Оценочная карта анализа представлена в таблице 3.2. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным

путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (3.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 3.2 – Конкурентоспособность технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	$B_{к1}$	$B_{к2}$	K_{ϕ}	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Технология эксплуатации	0,07	4	5	3	0,28	0,35	0,21
2. Надежность	0,11	5	5	4	0,55	0,55	0,44
3. Безопасность	0,11	4	4	5	0,44	0,44	0,55
4. Затраты на производство	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
5. Обогащение топлива	0,17	5	3	3	0,85	0,51	0,51
6. Коэффициент теплопроводности	0,09	4	4	4	0,36	0,36	0,36
7. Эффективный коэффициент размножения нейтронов	0,07	5	3	4	0,35	0,21	0,28
8. Доступность	0,08	5	3	5	0,4	0,24	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность ядерного топлива	0,09	4	4	5	0,36	0,36	0,45
2. Уровень проникновения на рынок	0,11	5	4	3	0,55	0,44	0,33
Итого	1	46	39	41	4,64	3,86	4,03

Результаты расчетов конкурентоспособности технических решений представлены в таблице 3.2, где K_{ϕ} соответствует разработка расчетной модели ТВС реактора ВВЭР-СКД на основе смешанного уран-плутониевого

топлива (PuO_2+UO_2), а ее основными конкурентами является $K_{к1}$ – урановое ядерное топливо (UO_2), $K_{к2}$ – смешанное уран-ториевое ядерное топливо ThO_2+UO_2 .

На основе представленного выше анализа можно сделать вывод, что конкурентоспособность проекта наиболее зависит от экономических критериев оценки эффективности, таких как конкурентоспособность ядерного топлива и уровень проникновения на рынок. Вес этих критериев составляет 0,09 и 0,11.

Технические критерии оценки ресурсоэффективности также важны для конкурентоспособности проекта, но их вес в итоговой оценке ниже, чем у экономических критериев. Наибольшую роль среди технических критериев играют обогащение топлива и надежность.

Критерии оценки ресурсоэффективности имеют важное значение для успешной реализации проекта. Наибольшую роль играют надежность, безопасность и затраты на производство.

Основным конкурентом является смешанное уран-плутониевое ядерное топливо PuO_2+UO_2 из-за достаточного высокого значения эффективного коэффициента размножения нейтронов и пониженного обогащения.

3.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения

конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Таблица 3.3 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны проекта	Слабые стороны проекта
С1.Повышение точности расчетов. С2.Научная новизна. С3.Возможность контроля процесса расчета. С4.Оптимизция процесса расчета. С5.Обоснование преимуществ каждой из топливных композиций.	Сл1.Погрешность расчетов. Сл2. Продолжительное время расчетов. Сл3.Высокий уровень компетенций для выполнения расчетов. Сл4.Появление программ с более низкой погрешностью. Сл5.Дополнительные проблемы с безопасностью и утилизацией ядерных материалов
Возможности	Угрозы
В1. Сокращение расходов на исследования и тестирование различных топливных композиций. В2. Сокращение затрат на обслуживание. В3.Актуальность темы для публикации в научных журналах. В4.Повышение безопасности работы реактора при уменьшении начального запаса реактивности. В5.Дополнительный спрос на результаты расчетов.	У1.Увеличенный риск возникновения аварийных ситуаций. У2.Отсутствие источников для проверки полученных результатов. У3.Сложность внедрения новых видов топливных композиций в работу. У4.Сокращение инвестиций в разработку новых топливных композиций.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые

имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз.

Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 3.3.

Итоговая матрица представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны проекта: С1.Повышение точности расчетов. С2.Научная новизна. С3.Возможность контроля процесса расчета. С4.Оптимизация процесса расчета. С5.Обоснование преимуществ каждой из топливных композиций.	Слабые стороны проекта: Сл1.Погрешность расчетов. Сл2. Продолжительное время расчетов. Сл3.Высокий уровень компетенций для выполнения расчетов. Сл4.Появление программ с более низкой погрешностью. Сл5.Дополнительные проблемы с безопасностью и утилизацией ядерных материалов
Возможности: В1. Сокращение расходов на исследования и тестирование различных топливных композиций. В2. Сокращение затрат на обслуживание. В3.Актуальность темы для публикации в научных журналах. В4.Повышение безопасности работы реактора при уменьшении начального запаса реактивности. В5.Дополнительный спрос на результаты расчетов.	Результаты анализа «Сильные стороны и возможности»: 1.Получение нейтронно-физических характеристик для любых топливных композиций, как следствие – формирование научной базы для различных публикаций.	Результаты анализа «Слабые стороны и возможности»: 1.Основной проблемой является погрешность в специализированных программах, а частые ошибки возникают из-за длительных расчетов, но данный фактор, влияющий на результаты расчета, зачастую можно устранить.
Угрозы: У1.Увеличенный риск возникновения аварийных ситуаций. У2.Отсутствие источников для проверки полученных результатов. У3.Сложность внедрения новых видов топливных композиций в работу. У4.Сокращение инвестиций в разработку новых топливных композиций.	Результаты анализа «Сильные стороны и угрозы»: 1.Реакторы по типу ВВЭР в настоящее время занимают одни из лидирующих позиций в атомной отрасли, что в свою очередь ставит под ответственность безопасность реакторных установок.	Результаты анализа «Слабые стороны и угрозы»: 1.Расчеты, выполненные инженерами, должны соответствовать знаниям, приложенным базам данных расчетов.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта.

Таблица 3.5 – Интерактивная матрица 1

Возможности проекта	Сильные стороны				
	С1	С2	С3	С4	С5
В1	0	+	+	+	+
В2	0	+	+	+	+
В3	+	+	0	+	+
В4	+	+	+	+	+
В5	+	+	+	+	+

Таблица 3.6 – Интерактивная матрица 2

Возможности проекта	Слабые стороны				
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
В1	-	-	+	+	0
В2	-	-	0	+	-
В3	0	+	+	+	+
В4	-	+	+	+	+
В5	-	0	+	+	+

Таблица 3.7 – Интерактивная матрица 3

Угрозы проекта	Сильные стороны				
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
У1	+	+	+	+	+
У2	+	+	+	+	0
У3	+	+	+	+	+
У4	0	-	+	+	+

Таблица 3.8 – Интерактивная матрица 4

Угрозы проекта	Слабые стороны				
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
У1	+	+	+	+	+
У2	+	+	+	-	+
У3	-	0	+	+	+
У4	+	0	+	-	0

Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»: формированию научной базы по представленной разработке реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя способствуют проделанные расчеты с использованием модернизированных компетенций.

Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»: основной проблемой является погрешность в специализированных программах, но данную проблему можно устранить, используя более мощным ПО.

Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: реакторы по типу ВВЭР в настоящее время занимают одни из лидирующих позиций в атомной отрасли, что в свою очередь несет за собой угрозу повышения опасности в эксплуатации на всех этапах реакторостроения.

Неточности, возникающие в результате расчетов, являются необходимыми для разработки усовершенствованного ядерного топлива для ЯЭУ.

Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: расчеты, выполненные инженерами, должны соответствовать всем требованиям, которые предъявляются к расчетчикам, участвующим в процессе проектирования и создания расчетной модели.

3.2 Планирование управления научно-техническим проектом

3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;

- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Оценочная карта для сравнения технических решений

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Студент, руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
Исследование и анализ предметной области	3	Анализ исходных данных	Студент
	4	Выбор метода выполнения работы	Студент, руководитель
	5	Календарное планирование	Студент
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Применение выбранного метода к данным	Студент
	7	Разработка расчетной модели в программе MSU	Студент
	8	Проведение расчетов	Студент
Оформление отчета по НИР	9	Анализ результатов работы	Студент
	10	Определение целесообразности проведения НИР	Студент, руководитель
	11	Разработка чертежа	Студент
	12	Составление пояснительной записки НИР	Студент
	13	Оформление пояснительной записки к НИР по ГОСТу	Студент

В таблице 3.9 представлены должности исполнителей, которыми являются студент 4 курса бакалавриата – Григорьева Анна Вадимовна, а также руководитель, доцент ОЯТЦ – Чертков Юрий Борисович. Руководителем была подготовлена методика выполнения работы совместно со студентом, также был проведен анализ целесообразности проведения расчетов по заявленной теме. Выбор темы работы и составление технического задания производился также совместно с руководителем.

3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, который зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож\ i}$ используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{\min\ i} + 2 \cdot t_{\max\ i}}{5}, \quad (3.2)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой рабочей чел.-дн.;

$t_{\min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой рабочей чел.-дн.;

$t_{\max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой рабочей чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ по нескольким исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (3.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой рабочей чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (3.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (3.5)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Расчет коэффициента календарности на период 2023 года:

$$k_{кал} = \frac{365}{365 - (T_{вых} + T_{пр})} = \frac{365}{365 - 118} = 1,477.$$

Временные показатели проведения научного исследования представлены в таблице Б1 (см. приложении Б).

Составлен план научного исследования, в котором разработан календарный план выполнения работ. Для построения таблицы временных показателей проведения НИ был рассчитан коэффициент календарности. С помощью показателей в таблицы 3.9 был разработан календарный план-график проведения НИР по теме. Для иллюстрации календарного плана была использована диаграмма Ганта, указывающая на целесообразность проведения данного исследования.

Календарный план-график проведения научного исследования представлен в таблице Б2 (см. приложении Б).

3.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- накладные расходы.

3.3.1 Расчет материальных затрат

При планировании бюджета научно-техническое исследование должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

Расчет материальных затрат осуществляется по формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi}, \quad (3.6)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расxi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 3.10.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – студент. Основные работы проводились за персональным компьютером (ноутбуком) в комнате жилого дома (общежития). Время, проведенное работой у компьютера, примем равным 840 часам. Мощность ноутбука: 0,7 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 4,39 \cdot 0,7 \cdot 840 = 2581, \quad (3.7)$$

где $C_{эл}$ – тариф на свет для населения, проживающего в Томске и других городских населенных пунктах Томской области в домах, оборудованных электрическими плитами и (или) электро-отоплением (односоставочный тариф на электроэнергию – 4,39 рублей за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 2581 рублей (С – студент).

В данную работу включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по заданной теме.

Таблица 3.10 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество		Цена за ед., руб.	Сумма, руб.	
		НР	С		НР	С
Бумага	шт.	0	250	3,16	0	790
Печать на листе А4	шт.	0	200	4	0	800
Карандаш	шт.	1	1	25	25	25
Ластик	шт.	1	1	12	12	12
Ручка	шт.	1	1	80	80	80
Доступ в интернет	месяц	4	4	350	1400	1400
Электроэнергия	кВт·ч	56	840	4,39	172	2581
Затраты на амортизацию оборудования						2055
Итого, рублей					1689	7743

В данной исследовательской работе к спецоборудованию, необходимому для проведения экспериментальных работ, относится компьютер, стоимость которого составляет 50000 рублей, назначенный срок службы – 7 лет, а также предполагается использование специального программного обеспечения MCU-PTR стоимостью 10 млн. рублей.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{аморт} = \frac{C_{об}}{T}, \quad (3.8)$$

где $C_{об}$ – стоимость оборудования (руб);

T – срок службы (дней).

$$C_{аморт} = \frac{50000}{365 \cdot 7} = 19,57 \text{ руб / дн.}$$

Оборудование использовалось в течение 105 дней, таким образом, затраты на оборудование:

$$C_{аморт(общ)} = 19,57 \cdot 105 = 2054,85 \text{ руб.}$$

3.3.2 Основная заработная плата исполнительской темы

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (3.9)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} \cdot T_p, \quad (3.10)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{осн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}} \quad (3.11)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

а) при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5–дневная неделя;

б) при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6–дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Баланс рабочего времени

Показатель рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные и праздничные дни)	118	118
Потери рабочего времени (отпуск и невыходы по болезни)	24	24
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223

Месячный должностной оклад работника (руководителя):

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_{\text{д}}) \cdot k_p, \quad (3.12)$$

где Z_{mc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 процентов от Z_{mc});

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

– оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор (см. «Положение об оплате труда», приведенное на интернет-странице Планово-финансового отдела ТПУ);

– стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.;

– иные выплаты; районный коэффициент.

Результаты расчетов заработной платы руководителя и студента представлены в таблице 3.12. Определим заработную плату (ЗП) студента, как ЗП лаборанта ТПУ

Таблица 3.12 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_{mc} , руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{он}$, руб.	T_p , дни	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	35500	1,3	46150	2152,29	7	15066,03
Студент	10000	1,3	13000	606,27	105	63658,35
Итого, руб.						78724,38

3.3.3 Расчет дополнительной заработной платы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по формуле:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн}, \quad (3.13)$$

где $k_{дон}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Результаты расчета дополнительной заработной платы представлено в таблице 3.13:

Таблица 3.13 – Расчет дополнительной заработной платы

Исполнители	Основная ЗП, руб.	$k_{дон}$	Дополнительная ЗП, руб.
Руководитель	15066,03	0,12	1807,92
Студент	63658,35	0,12	7639,02
Итого, руб.			9446,92

3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Единая базовая ставка для уплаты страховых взносов с 1 января 2023 года составляет 30%. Она применяется при расчете суммы страховых взносов до достижения предельной базы.

С превышения предельной базы страховые взносы рассчитываются по ставке 15,1%.

Таблица 3.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Основная ЗП, руб	Дополнительная ЗП, руб
Руководитель	15066,03	1807,92
Студент	63658,35	7639,02
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,30	
Сумма отчислений, руб.		
Руководитель	5062,19	
Студент	21389,21	
Итого, руб.	26451,40	

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{дон}), \quad (3.14)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 3.14.

3.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов. Их величина определяется по формуле:

$$Z_{накл} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{нр} \quad (3.15)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Накладные расходы в ТПУ составляют 12-16 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы.

Примем, что $k_{нр} = 16\%$.

Накладные расходы составляют:

$$\begin{aligned} Z_{накл} &= (\sum \text{статей}) \cdot k_{нр} = (Z_{осн} + Z_{доп}) \cdot k_{нр} \\ Z_{накл} &= (15066,03 + 1807,92) \cdot 0,16 = 2699,83 \text{ руб.} \\ Z_{накл} &= (63658,35 + 7639,02) \cdot 0,16 = 11407,57 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Итого накладные расходы составили:

- для руководителя – 2699,83 руб.;
- для студента – 11407,57 руб.

3.3.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основной для формирования бюджета затрат проекта, которая является нижним пределом затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Расчет бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование	Сумма, руб.		Примечание
	Руководитель	Студент	
Материальные затраты, руб.	1689	7743	Таблица 11
Основная ЗП, руб.	15066	63658	Таблица 13
Дополнительная ЗП, руб.	1808	7639	Таблица 14
Отчисления во внебюджетный фонд, руб.	5062	21389	Таблица 15
Накладные расходы, руб.	2700	11408	Пункт 3.3.5
Бюджет затрат (итого), руб.	26325	111837	Сумма 138162 руб.

3.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (3.16)$$

где $I_{финр}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее

численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Для сравнения был выбран аналог проекта с использованием более дорогого ПО, стоимость которого составляет 100000 рублей. Выбор более дорогого аналога для сравнения с программой MSU может быть обусловлен несколькими причинами. Во-первых, более дорогие ПО могут иметь более точные расчетные методы, что может привести к более точным результатам расчетов. Во-вторых, могут иметь более широкий функционал, что может позволить рассчитывать более сложные и реалистичные сценарии. В-третьих, использование более дорогих ПО может повысить уровень доверия к результатам расчетов, особенно если эти программы имеют подтвержденную научную репутацию и широко используются в отрасли.

В контексте моделирования ТВС реактора ВВЭР-СКД, использование более дорогого ПО для сравнения с MSU может позволить проверить точность расчетов и подтвердить их достоверность. Кроме того, использование аналога может помочь выявить возможные ошибки в моделировании, которые могут быть учтены в более дорогой программе, но были упущены в MSU. Таким образом, выбор более дорогого ПО может повысить достоверность результатов расчетов и улучшить качество исследования.

Тогда интегральный финансовый показатель для двух разработок определяется как:

$$I_{финр}^{исп.1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{138162}{138162} = 1;$$
$$I_{финр}^{исп.2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{140718}{138162} = 1,03.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (3.17)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности стоит производить в форме таблицы 3.16:

Таблица 3.16 – Оценка характеристик исполнения проекта

Критерии /объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналогичный проект
Производительность	0,3	4	5
Удобство в эксплуатации	0,2	5	5
Помехоустойчивость	0,1	4	5
Надежность	0,25	4	5
Материалоемкость	0,15	5	5
Итого	1	4,4	5

По формуле 3.17 вычисляем:

$$I_{p1} = 4,35; I_{p1} = 5.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{испi}$) определяется по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} \text{ и т.д.} \quad (3.18)$$

По формуле 18 вычисляем:

$$I_{исп.1} = \frac{4,35}{1} = 4,35, I_{исп.2} = \frac{5}{1,03} = 4,85.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных.

Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{ucn1}}{I_{ucn2}},$$

$$\mathcal{E}_{cp1} = \frac{4,35}{4,85} = 0,89;$$

$$\mathcal{E}_{cp2} = \frac{4,85}{4,35} = 1,12;$$
(3.19)

Эффективность разработки представлена в таблице 3.17:

Таблица 3.17 – Эффективность разработки

Показатели	Исполнение 1	Исполнение 2
Интегральный финансовый показатель разработки	1	1,03
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,35	5
Интегральный показатель эффективности	4,35	4,85
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,89	1,12

По полученным результатам можно сделать вывод, что проектируемая разработка наиболее эффективна в финансовом плане. Исполнение 2 более эффективно, чем исполнение 1, так как показатели интегральной ресурсоэффективности и эффективности выше в исполнении 2. Исполнение 2 дороже, чем исполнение 1, так как интегральный финансовый показатель разработки выше у исполнения 2. Сравнительная эффективность вариантов исполнения говорит о том, что исполнение 2 более эффективно, но при этом более затратно, чем исполнение 1.

При выборе между исполнением 1 и исполнением 2 необходимо учитывать не только эффективность, но и финансовую сторону вопроса, а также особенности конкретного проекта.

4 Социальная ответственность

В настоящее время одним из основных направлений профилактической работы по снижению травмоопасности производства является внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть объединения всех связанных мероприятий в единую систему на всех стадиях производственного процесса [17].

В настоящей работе проведен нейтронно-физический расчет реакторной установки со сверхкритическими параметрами теплоносителя с использованием различных топливных композиций, произведена оптимизация параметров ТВЭЛ реактора ВВЭР-СКД, определены характеристики, которые соответствуют безопасности реакторной установки. Расчет проводился с использованием программного комплекса MSU на персональном компьютере в 248 аудитории 10 корпуса ТПУ.

В данном разделе рассматриваются следующие опасные и вредные факторы:

- отклонение показателей микроклимата;
- повышенный уровень шума;
- недостаток освещения рабочей зоны;
- нормы радиационной безопасности;
- пожаро- и взрывобезопасность;
- электрический ток.

4.1 Компоновка исследовательской рабочей зоны

Рабочая зона исследователя состоит из стула, рабочего стола и размещенного на столе персонального компьютера (ПК). Работа с ПК должна осуществляться в помещении площадью не менее 6 м². Размеры рабочей поверхности стола должны соответствовать следующим параметрам: ширина

не менее 1200 мм, глубина не менее 600 мм. Высота стола должна быть не менее 600 мм и позволять размещать ноги, ширина основания должна быть не менее 500 мм.

Рабочее кресло (стул) должны обеспечивать поддержание оптимальной рабочей позы с целью предотвращения развития усталости и снижения статического напряжения мышц. Кресло должно подбираться под рост, иметь возможность регулирования высоты, угла наклона и поворота сидения и спинки, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой от остальных и легкой в проведении [18,26].

4.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

В ГОСТ 12.0.003-2015 приведены потенциальные вредные и опасные факторы, которые могут иметь место при проведении запланированных работ и эксплуатации рабочего места [19].

Производственные условия на рабочем месте в кабинете 248 10 корпуса ТПУ характеризуются наличием опасных и вредных факторов (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Потенциальные опасные и вредные факторы

Наименование видов работ	Факторы (вредные и опасные) согласно ГОСТ 12.0.003-2015	Нормативные документы
Работа на ПЭВМ	Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [20].
	Повышенный шум	
	Недостаток освещенности рабочей зоны	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение [21].

Продолжение таблицы 4.1

Наименование видов работ	Факторы (вредные и опасные) согласно ГОСТ 12.0.003-2015	Нормативные документы
Работа на ПЭВМ	Воздействие электрического тока	ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [22].
	Пожаро- и взрывобезопасность	ФЗ от 22.07.2008 N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [24].
	Нормы радиационной безопасности	СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 [23].

Основное влияние оказывают физические факторы, такие как: влажность воздуха, температура среды, в которой находится студент, шум, освещенность, так же наличие различного рода излучения и статическое электричество.

4.3 Освещённость рабочей зоны

Недостаточное освещение рабочей зоны ухудшает работоспособность и вызывает усталость человека.

Свет – важный фактор, влияющий на работоспособность человека. Он может быть как естественным (солнце), так и искусственным (электрические лампы). Однако, длительная работа в условиях недостаточной освещенности и других параметров световой среды может привести к снижению зрительного восприятия, развитию близорукости и головной боли. Поэтому, одной из главных задач светотехнических расчетов является определение необходимой мощности электрической освещенности.

Для рассматриваемого типа работ допускается применение системы общего равномерного освещения.

Общее освещение – освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения. В зависимости от расположения светильников различают равномерное и локализованное освещение. При равномерном освещении светильники располагаются в верхней зоне помещения равномерно, обеспечивая одинаковую освещенность помещения.

Основной поток естественного света должен быть слева. Солнечные лучи и блики не должны попадать в поле зрения оператора и на мониторы. Экран монитора должен располагаться в зоне защитного узла светильника, и его проекция должна быть вне экрана монитора.

Согласно справочной литературе, освещенность в кабинете высшего учебного учреждения 300 лк [21]. Необходимое количество светильников N определяется с помощью выражения:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K}{U \cdot n \cdot \Phi_{\lambda}}, \quad (4.1)$$

где E – требуемая освещенность;

S – площадь кабинета, 50 м²;

K – коэффициент запаса, учитывающий снижение освещенности при эксплуатации равный 1,4;

U – коэффициент использования равный 0,49;

n – количество ламп в светильнике, $n = 4$;

Φ_{λ} – световой поток одной лампы равный 1050 Лм.

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K}{U \cdot n \cdot \Phi_{\lambda}} = \frac{300 \cdot 50 \cdot 1,4}{0,49 \cdot 4 \cdot 1050} = 10,2 \text{ шт.} \quad (4.2)$$

Во избежание недостаточного освещения рабочего пространства расчетное количество светильников округляется до целого в большую сторону. Таким образом, необходимое количество светильников в кабинете 248 10-го корпуса равняется 11-ти штукам, что соответствует фактическим значениям.

4.4 Превышение уровня шума

На уровень шума влияет работа механических и электромеханических устройств – части электрооборудования, системы кондиционирования, вентиляторы охлаждения ПК. Максимальный уровень звука при постоянном шуме составляет 30 дБ, при непостоянном – 75 дБ [20]. Постоянный шум негативно влияет на работоспособность и нервную систему человека.

В таблице 4.3 приведены значения ПДУ шума, которые устанавливаются на рабочих местах во время работы на ПЭВМ [20,29].

Таблица 4.3 – Значения ПДУ шума

Нормативные документы	Допустимые значения ПДУ шума, дБ
ГОСТ 12.1.003-83	Не более 75
СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03	Не более 75
Приказ Минтруда РФ № 915н от 09.12.2021	Не более 75

Основным источником шума для аудитории 248 является шум вентиляторов охлаждения ПК. Для используемых ПК уровень шума, создаваемого вентилятором, согласно описанию системы, не превышает 20 дБ. При условии, что шум вентилятора зависит от задействованной вычислительной мощности ПК, его можно считать непостоянным источником шума, поэтому общий уровень шума в помещении не превышает установленный предел. Дополнительная шумоизоляция оборудования не требуется.

Кабинет 248 в 10 корпусе ТПУ удовлетворяет заявленным требованиям, которые представлены в нормативных документах [20,29].

4.5 Микроклимат

Микроклимат рабочей среды – состояние внутренней среды рабочего помещения, оказывающее воздействие на человека, характеризуемое показателями температуры воздуха, влажностью и подвижностью воздуха. В таблице 4.4 представлены оптимальные нормы микроклимата в рабочей зоне.

Таблица 4.4 – Оптимальные нормы микроклимата в рабочей зоне

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	20÷25	15÷75	0,1
Тёплый	21÷28	15÷75	0,2

Переносимость человеком температуры зависит от влажности и скорости окружающего воздуха. При большой влажности перегрев наступает быстрее вследствие малого испарения пота с поверхности кожи. При недостаточной влажности испарение проходит интенсивнее, что приводит к пересыханию и растрескиванию кожи и слизистых оболочек.

Как важный момент безопасной работы можно выделить обеспечение системой отопления достаточного уровня тепла в производственных помещениях, особенно в зимнее время года, когда температура воздуха на улице может быть ниже 0 °С [27].

В компьютерных помещениях должна проводиться ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы. Для поддержания нормальных параметров микроклимата в рабочей зоне применяют устройства систем вентиляции, кондиционирования воздуха и отопления [30].

В кабинете необходима кратность воздухообмена 40 м³/ч на одного человека [30]. Кабинет, в котором выполнялась работа рассчитан на 3 рабочих места, таким образом производительность вентиляции составит:

$$L = k \cdot Q = 3 \cdot 40 = 120 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}, \quad (4.3)$$

где k – количество человек;

Q – кратность воздухообмена на одного человека.

Такую производительность обеспечивает вентилятор типа Вентс 125 ВКО с максимальной производительностью 185 м³/ч и мощностью 16 Вт [31].

4.6 Радиационная безопасность

Основные принципы радиационной безопасности [23]:

- принцип нормирования: непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения от всех источников;
- принцип обоснования: запрещение всех видов деятельности по использованию источников, если полученная от этого польза не превышает риск возможного вреда, причиненного излучением;
- принцип оптимизации: поддержание индивидуальных доз облучения и числа облучаемых на возможно низком и достижимом уровне.

В НРБ-99/2009 [23] выделяются три группы лиц, взаимодействующих с излучением: персонал группы А, Б и все остальное население.

Эффективная доза для персонала группы А от всех источников не должна быть больше 20 мЗв в год в среднем за последовательные 5 лет, но не должна превышать 50 мЗв за один год. Для персонала группы Б аналогично средняя доза за год не должна быть больше 1 мЗв и не больше 5 мЗв за один год. Для студентов, проходящих обучение с использованием источников излучения, полученные дозы не должны превышать установленную для персонала группы Б.

В кабинете 248 10 корпуса ТПУ источники излучения не размещены, также не происходит взаимодействия работников с источниками излучения.

4.7 Электробезопасность

В соответствии с [22], при работе с электронно-вычислительными машинами (ЭВМ) в рабочем кабинете, который относится к 1-й категории по электробезопасности и где на рабочем месте отсутствуют электроустановки с напряжением свыше 1000 В, необходимо соблюдать некоторые условия для электрооборудования и электросети:

- необходимо установить защитное заземление рабочего места и ЭВМ в соответствии с требованиями нормативных документов;
- электроустановки с напряжением выше 1000 В не должны присутствовать на рабочем месте;
- розетки, к которым подключаются ЭВМ и другие электрические устройства, должны соответствовать требованиям безопасности и быть установлены на безопасном расстоянии от рабочего места.

Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

1. При прикосновении к токоведущим частям электроустановок:
 - открытым проводникам или контактными элементами электроустановок с напряжением выше безопасного значения (обычно выше 50 В переменного тока или 120 В постоянного тока);
 - оборудованию, находящемуся под напряжением при повреждении изоляции.
2. При неправильном выполнении работ на электроустановках:
 - отсутствии соответствующей ограждения или изоляции токоведущих частей;
 - нарушении правил эксплуатации, монтажа или ремонта электрооборудования.
3. При работе вблизи электроустановок:

– возможности попадания под напряжение при неправильной организации рабочего места или отсутствии необходимых средств защиты.

4. При работе в условиях повышенной влажности или в сырых помещениях:

– возможности увеличения проводимости тела человека и повышения вероятности поражения током.

5. При использовании неисправного или некачественного электрооборудования:

– непредсказуемого поведения электроустройств при отказе изоляции, перегреве или иных неисправностях.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок включают:

1. Классификацию помещений по степени опасности поражения электрическим током. Помещения разделяются на классы по наличию и характеру возможных опасностей, и в каждом классе применяются соответствующие меры безопасности.

2. Проведение мероприятий по защите от поражения электрическим током:

– использование защитного заземления для обеспечения безопасного уровня потенциала;

– применение изоляции электроустановок для предотвращения прямого контакта с токоведущими частями;

– использование дополнительных средств защиты, таких как предохранительные вставки и предохранительные клапаны.

4.8 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [24], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности

помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- искрообразующее оборудование и электрические установки;
- перегрев и неправильное использование электрических приборов и оборудования;
- повреждение электропроводки и нарушение изоляции;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям по обеспечению противопожарной безопасности в помещении категории В могут относиться:

- установка и регулярная проверка пожарной сигнализации и системы автоматического пожаротушения;
- установка противопожарных дверей, которые должны быть закрыты во время работы и обеспечивать надлежащую огнестойкость;
- размещение огнетушителей и другого противопожарного оборудования в доступных местах и их регулярная проверка и обслуживание;
- применение специальных материалов с повышенной огнестойкостью при отделке и конструкции помещений;
- обеспечение правильной эксплуатации электрического оборудования, включая устранение дефектов, перегрузок и коротких замыканий;

- обеспечение достаточной вентиляции помещения для предотвращения скопления паров или газов, которые могут быть воспламеняемыми;

- обеспечение исправности и регулярной проверки системы электроосвещения и аварийного освещения для обеспечения безопасного эвакуирования в случае пожара;

- установка системы оповещения о пожаре, которая должна быть видимой и слышимой для всех работников в помещении.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [24]:

- запрещается курение внутри помещения;

- запрещается хранение горючих материалов и легковоспламеняющихся жидкостей в неподходящих контейнерах или без необходимых мер безопасности;

- необходимо обеспечить надлежащую уборку помещения и удаление горючих отходов;

- в помещении должны быть четко обозначены и легко доступны огнетушители и другое противопожарное оборудование;

- проведение регулярных проверок электрического оборудования на наличие дефектов и перегрузок, а также своевременное устранение выявленных проблем;

- обеспечение обучения персонала правилам пожарной безопасности и проведение регулярных тренировок по эвакуации и действиям при возникновении пожара;

- правильное использование и хранение легковоспламеняющихся материалов и химических веществ с соблюдением соответствующих мер безопасности;

- регулярная проверка и обслуживание системы пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС, по тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

4.9 Аварийные и чрезвычайные ситуации на предприятии

В таблице В1 (см. приложение В) рассмотрены аварийные и чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть на рабочем месте, меры их предотвращения и действия в случае их возникновения.

4.10 Вывод по разделу

В разделе выявлены опасные и вредные факторы, воздействию которых может подвергнуться сотрудник при проведении исследовательской работы, связанной с работой за ПЭВМ:

- микроклимат [20];
- недостаточная освещенность [21];
- нормы радиационной безопасности [23].
- шум [29].

Определено, что кабинет 248 10-го корпуса относится:

- к 1-й категории по электробезопасности [22];
- к категории В по пожарной и взрывной безопасности [24].

Выполняемая работа не сопряжена с высоким риском травматизма. Также рассмотрены меры по предотвращению наиболее вероятных аварийных

и чрезвычайных ситуаций на рабочем месте, а также меры в случае их возникновения.

Заключение

В результате проведения нейтронно-физического расчета параметров ТВС, находящейся в центральной части активной зоны реактора ВВЭР-СКД с использованием различных топливных композиций, было выявлено, что самоподдерживающаяся цепная реакция деления возможна при использовании смеси $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$ с минимальным обогащением (природное содержание U^{235}), однако для UO_2 и $\text{ThO}_2 + \text{UO}_2$ необходимо достаточно высокое содержание делящегося материала.

В данной работе была проведена оценка влияния различных топливных композиций с содержанием урана, плутония и тория на нейтронно-физические характеристики, такие как запас реактивности, длительность кампании топлива и глубина выгорания с различным содержанием делящегося материала (1%, 5%, 10%, 15%, 19,9%).

В ходе исследования было обнаружено, что смешанное уран-плутониевое топливо с низким обогащением ($\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$) может быть пригодным для реактора ВВЭР-СКД. При содержании делящегося материала 1% и 5% данная топливная композиция обеспечивает высокую глубину выгорания и длительность кампании в 10000 суток. Однако, для использования других топливных композиций, таких как диоксид урана (UO_2) и смешанное топливо на основе тория ($\text{ThO}_2 + \text{UO}_2$), требуется более высокое содержание делящегося материала.

Графические зависимости показали, что начальный запас реактивности, длина кампании и глубина выгорания сильно зависят от радиуса твэл и содержания делящегося материала. Топливная композиция с плутонием демонстрирует наибольший запас реактивности и длину кампании при проектном значении радиуса твэл (0,535 см) точно также как и топливо на основе тория при 19,9% обогащении имеет наибольшую длину кампании топлива, что является важным фактором для обеспечения устойчивой работы реактора ВВЭР-СКД.

Топливная композиция на основе тория (ThO_2+UO_2) имеет низкий начальный запас реактивности, что положительно сказывается на безопасности реакторной установки. Однако, для обеспечения стабильной работы при проектных значениях реактора ВВЭР-СКД требуется достаточно высокое содержание делящегося материала.

Топливная композиция с диоксидом урана (UO_2) обладает наименьшей длиной кампании среди рассмотренных вариантов и составляет примерно 7280 суток. Начальный запас реактивности изменяется слабо с ростом параметров тепловыделяющего элемента.

Таким образом, в контексте данного исследования рекомендуется рассмотреть возможность использования смешанного уран-плутониевого топлива (PuO_2+UO_2) с низким обогащением в реакторной установке ВВЭР-СКД, с учетом оптимальных значений диаметра ТВЭЛ и топлива. Дополнительные исследования и расчеты могут быть проведены для более подробного анализа и оптимизации параметров данного типа реактора.

В ходе исследования влияния содержания плутония в МОХ-топливе было выявлено, что для обеспечения стабильной и безопасной работы реактора типа ВВЭР-СКД не обязательно иметь высокое содержание плутония. Также в дальнейшем предполагается рассмотреть использование реакторной установки со сверхкритическими параметрами теплоносителя в контексте замыкания ядерного топливного цикла.

В ходе выполнения исследовательского проекта были соблюдены все требования безопасности. Рабочее место было хорошо освещено. При использовании ЭВМ были соблюдены требования по электро- и пожаробезопасности. В результате выполнения работы травм получено не было.

Список использованных источников

1. Акулин И. Е., Базова Т. В. Ядерные реакторы IV поколения //Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2021. – С. 14-17.
2. Калмыкова Д.С. Ядерная энергетика будущего. Реакторы нового поколения //Молодежь и системная модернизация страны. – 2022. – С. 166-168.
3. Глебов А. П. Развитие атомной энергетики в России и мире с реакторами поколений 3+ и 4 //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – №. 1. – С. 77-93.
4. Грузинцев Д. С., Шелегов А. С. Численное моделирование теплообмена в ТВС реактора ВВЭР-СКД //Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – №. 2 (11). – С. 59-63.
5. Коротких А. Г., Ранган Ф. К. П. теплогидравлический расчет каналов ядерных реакторов ВВЭР И SCWR //Атомная энергия. – 2021. – Т. 131. – №. 3. – С. 138-142.
6. Лапин А. С. и др. Исследование системных характеристик реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя //Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2020. – №. 3. – С. 93-101.
7. Махин В. М. и др. Использование опыта создания и эксплуатации одноконтурных реакторов с кипением и ядерным перегревом теплоносителя для проектирования реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя //Физика ядерных реакторов. – 2021. – С. 4.
8. Глебов А. П. Проблемы физики и теплогидравлики в реакторах, охлаждаемых водой сверхкритического давления //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – №. 2. – С. 64-81.
9. Глебов А. П. Реакторы SCWR для будущей атомной энергетики в России и мире.

10. А.В. Лапин; В.М. Махин Анализ схем циркуляции теплоносителя в активной зоне легководных энергетических реакторов и предложения по активной зоне реактора ВВЭР-СКД – ОАО ОКБ «Гидропресс»

11. Красильников И. С. Водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическими параметрами-технологический прорыв в развитии АЭС //Экономические и социальные аспекты развития энергетики. Энергия-2019. – 2019. – С. 61-61.

12. А.П. Глебов, А.В. Клушин предварительные нейтронно-физические расчеты экспериментального реактора ВВЭР-СКД-30. ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И Лейпунского., г. Обнинск. (дата обращения: 17.03.2022).

13. Алексеев П. Н. и др. К стратегии развития ядерной энергетики России //Атомная энергия. – 2019. – Т. 126. – №. 4. – С. 183-187.

14. Аксенова К. С., Лапкис А. А. Сравнительный анализ воспроизводящих свойств ВВЭР и ВВЭР-СКД теплоносителем в замкнутом ядерном топливном цикле //научная сессия НИЯУ МИФИ-2020 по направлению "Инновационные ядерные технологии". – 2020. – С. 98-100.

15. Глебов А. П. и др. Развитие направления SCWR от концепции до тестового реактора //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – №. 3. – С. 30-44.

16. И.Н. Бекман. Торий. Томск: Изд-во Томского университета, 2005. 120 с. (серия "Энергетика").

17. Российская Федерация. Законы. Трудовой Кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 197 ФЗ: [Принят Государственной Думой 21 декабря 2001 года: Одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года]. – Текст: электронный // КонсультантПлюс: [Сайт]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения: 10.05.2023). – Текст: электронный.

18. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования: дата введения 1979-01-01. – URL:

<https://docs.cntd.ru/document/1200003913> (дата обращения 10.05.2023) – Текст: электронный.

19. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация: дата введения 2017-03-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071> (дата обращения 12.05.2023) – Текст: электронный.

20. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года N 2. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6560Ю> (дата обращения 10.05.2023). – Текст: электронный.

21. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение: дата введения 2017-05-08. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения 12.05.2023). – Текст: электронный.

22. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность: дата введения 1983-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст: электронный.

23. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения 10.05.2023). – Текст: электронный.

24. Российская Федерация. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности": принят Государственной Думой 4 июля 2008 года: одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 года]. – Текст: электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения 10.05.2023). – Текст: электронный.

25. Российская Федерация. Трудовой кодекс Российской Федерации (с изменениями на 20 апреля 2021 года): Федеральный закон № 197-ФЗ: [Принят Государственной Думой 21 декабря 2001 г.]. – Москва, 2021 – 246 с.
26. crabo.ru : компьютерный портал : сайт. – Москва, 2021. – URL: <https://crabo.ru/> (дата обращения:12.05.2023). – Текст: электронный.
27. ГОСТ 30494-2011 "Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования".
28. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 № 181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07. – С. 4.
29. ГОСТ 12.1.003-83 "ССБТ. Шум. Общие требования безопасности"
30. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование: дата введения 2004-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035579> (дата обращения: 12.05.2023). – Текст: электронный.
31. Vents : сайт. – 2017-2021.– URL: <https://www.vents.ru/> (дата обращения 12.05.2023). – Текст: электронный.

Приложение А
(обязательное)

Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б1 – Временные показатели проведения научного исследования

№ работы	Вид работ	Продолжительность работ						Исполнители	T_{pi} , человеко-дни		T_{ki} , человеко-дни	
		t_{mini} , человеко-дни		t_{maxi} , человеко-дни		$t_{ожг}$, человеко-дни			Р	С	Р	С
		Р	С	Р	С	Р	С					
1	Составление и утверждение ТЗ	1	1	2	2	1,40	1,40	2	0,7	0,7	1,03	1,03
2	Подбор и изучение материалов по теме	0	15	0	18	0,00	16,20	1	0	16,2	0,00	23,94
3	Анализ исходных данных	0	7	0	10	0,00	8,20	1	0	8,2	0,00	12,12
4	Выбор метода выполнения работы	3	3	6	6	4,20	4,20	2	2,1	2,1	3,10	3,10
5	Календарное планирование	0	3	0	5	0,00	3,80	1	0	3,8	0,00	5,62
6	Применение выбранного метода к данным	0	10	0	13	0,00	11,20	1	0	11,2	0,00	16,55
7	Разработка расчетной модели в программе MSU	0	5	0	8	0,00	6,20	1	0	6,2	0,00	9,16

Продолжение таблицы Б1

№ работы	Вид работ	Продолжительность работ						Исполнители	T_{pi} , человеко-дни		T_{ki} , человеко-дни	
		$t_{\min i}$, человеко-дни		$t_{\max i}$, человеко-дни		$t_{ож\ i}$, человеко-дни			Р	С	Р	С
		Р	С	Р	С	Р	С					
8	Проведение расчетов	0	4	0	7	0,00	5,20	1	0	5,2	0,00	7,68
9	Анализ результатов работы	0	3	0	7	0,00	4,60	1	0	4,6	0,00	6,80
10	Определение целесообразности проведения НИР	3	3	5	5	3,80	3,80	2	1,9	1,9	2,81	2,81
11	Разработка чертежа	0	4	0	6	0,00	4,80	1	0	4,8	0,00	7,09
12	Составление пояснительной записки НИР	0	3	0	4	0,00	3,40	1	0	3,4	0,00	5,02
13	Оформление пояснительной записки к НИР по ГОСТу	0	2	0	4	0,00	2,80	1	0	2,8	0,00	4,14

Р – руководитель, С – студент.

Таблица Б2 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работы	Вид работ	Исполнители	T_{ki}	Продолжительность выполнения работ											
				Февраль		Март			Апрель			Май			
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение ТЗ	Руководитель	1												
		Студент	1												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель	0												
		Студент	24												
3	Анализ исходных данных	Руководитель	0												
		Студент	12												
4	Выбор метода выполнения работы	Руководитель	3												
		Студент	3												
5	Календарное планирование	Руководитель	0												
		Студент	6												
6	Применение выбранного метода к данным	Руководитель	0												
		Студент	17												
7	Разработка расчетной модели в программе MSU	Руководитель	0												
		Студент	9												
8	Проведение расчетов	Руководитель	0												
		Студент	8												
9		Руководитель	0												

№ работы	Вид работ	Исполнители	T_{ki}	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль		Март			Апрель			Май					
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
	Анализ результатов работы	Студент	7														
10	Определение целесообразности проведения НИР	Руководитель	3														
		Студент	3														
11	Разработка чертежа	Руководитель	0														
		Студент	7														
12	Составление пояснительной записки НИР	Руководитель	0														
		Студент	5														
13	Оформление пояснительной записки к НИР по ГОСТу	Руководитель	0														
		Студент	4														

 - Студент,  - Руководитель.

Приложение В

(обязательное)

Таблица В1 – АС и ЧС, меры по их предотвращению и ликвидации последствий

№	Аварийные и чрезвычайные ситуации	Меры предотвращения аварийных и чрезвычайных ситуаций	Действия в случае возникновения аварийных и чрезвычайных ситуациях
1	Пожар	1) проверять состояние электротехнических устройств и отопительных приборов; 2) соблюдать правила пожарной безопасности согласно требованиям нормативной документации; 3) проводить обучение и инструктаж сотрудников, отрабатывать навыки пожаротушения.	1) при возникновении пожара звонить 01,101,112; 2) в качестве средств тушения использовать порошковые и углекислотные огнетушители.
2	Поражение электрическим током	1) не допускать повреждения изоляции токоведущих частей электрических установок; 2) проводить плановые проверки электрооборудования; 3) соблюдать допустимое расстояние между изоляторами и проводами; 4) выполнять правила техники безопасности и технической эксплуатации; 5) проводить обучение и инструктаж работников; 6) установить защитное заземление.	1) отключить напряжение на поврежденной установке; 2) отгородить место, поставить знаки; 3) при наличии пострадавших оказать первую помощь и вызвать скорую помощь по телефонам 112, 103.

Продолжение таблицы В1

3	Травмирование в результате падения с высоты	<p>1) необходимо убедиться, что компьютерные провода не находятся на пути передвижения, в случае нарушения сообщить руководителю;</p> <p>2) не использовать вместо лестницы стул, стол и т.д.;</p> <p>3) не допускать размещения оборудования и документации на полках и шкафах, доступ к которым невозможен без стремянки;</p> <p>4) передвигаясь по лестницам, всегда необходимо держаться за поручень и смотреть под ноги;</p> <p>5) не держать руки в карманах, т.к. в случае падения инстинктивные движения помогут удержаться на ногах;</p> <p>6) никогда не переносить предметы, держа их перед собой, закрывая обзор;</p> <p>7) очищать обувь от грязи, льда и прочих загрязнений перед входом в здание;</p> <p>8) проводить обучение и инструктаж работников.</p>	<p>1) провести осмотр тела и головы пострадавшего на наличие открытых ран и ссадин;</p> <p>2) попросить произвести движения кончиками пальцев, что позволит исключить повреждения позвоночника;</p> <p>3) движение руками и ногами позволит исключить наличие переломов;</p> <p>4) опросить пострадавшего о нарушениях общего самочувствия: головокружении, сонливости, тошноте – эти признаки свидетельствуют о сотрясении мозга;</p> <p>5) в случае отсутствия серьёзных травм на место ушиба кладут холодный компресс и сопровождают пострадавшего до дома;</p> <p>6) в случае наличия серьёзных травм необходимо позвонить в 03(103) или 112 и сообщить о случившемся.</p>
---	---	--	--