

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02. Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Нейтронно-физический расчёт ядерного реактора типа ВВЭР
УДК 621.039.512:621.039.577

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Богач Егор Андреевич		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Киселева Е.С.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерная физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым 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; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать

	опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Бычков П.Н.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Богачу Егору Андреевичу

Тема работы:

Нейтронно-физический расчёт ядерного реактора типа ВВЭР	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none"> – Тепловая мощность 1500 [МВт] – Ядерное горючее UO_2 – Обогащение урана 4 % – Температура на входе 260 [°C] – Температура на выходе 280 [°C] – Твэлы стержневые с наружным охлаждением – Материалы оболочек твэлов и кассет сталь 1Х18Н9Т.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none"> – Предварительный теплофизический расчёт реактора – Нейтронно-физический расчёт «холодного» и «горячего» состояния реактора – Нейтронно-физический расчёт реактора в программном комплексе WIMS-D5B – Расчёт эффектов отравления реактора Xe-135 и Sm-149

Перечень графического материала	– Презентация – Сборочный чертёж – Спецификация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Доцент ОСГН ШБИП, к.э.н. Киселева Е.С.
Социальная ответственность	Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ, к.ф.-м.н. Гоголева Т.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
нет	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	27.04.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		27.04.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Богач Егор Андреевич		27.04.2020

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Богачу Егору Андреевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	– 30% премии; 20% надбавки; 30% районный коэффициент.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	– провести SWOT-анализ.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	– выявить структуру работ и их исполнителей; – определить трудоемкость проводимых работ; – разработать график проведения исследования; – рассчитать размер бюджета исследования.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	– оценить экономическую эффективность проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Бюджет проведения НИ</i>
4. <i>Диаграмма Гантта</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	27.04.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		27.04.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Богач Егор Андреевич		27.04.2020

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Богачу Егору Андреевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

Нейтронно-физический расчёт ядерного реактора типа ВВЭР

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Нейтронно-физический расчёт реактора типа ВВЭР.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронновычислительным машинам и организации работы. – Трудовой кодекс Российской Федерации
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов	<ul style="list-style-type: none"> – электрический ток; – отклонение показателей микроклимата; – превышение уровня шума; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – психофизиологические факторы.
3. Экологическая безопасность:	– экологические проблемы утилизации ПЭВМ и ВДТ.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– анализ типичной ЧС – пожар в рабочем помещении.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	27.04.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.э.н.		27.04.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Богач Егор Андреевич		27.04.2020

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Уровень образования высшее
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла
 Период выполнения весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.04.2020	Выдача задания	...
30.04.2020	Выбор конструктивной схемы	...
10.04.2020	Расчёт «холодного» состояния реактора	
17.04.2020	Оптимизация параметров ячейки	
20.04.2020	Расчёт «горячего» состояния реактора	
27.04.2020	Расчёт эффектов отравления реактора	
11.05.2020	Расчёт реактора в WIMS-D5	
18.05.2020	Оценка значения КВ	
08.06.2020	Сдача работы	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		27.04.2020

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 102 с., 22 рис., 25 табл., 32 источника, 5 прил., 1 чертеж, 1 спецификация.

Ключевые слова: водо-водяной реактор, нейтронно-физический расчёт, программный комплекс WIMS-D5B, отравление, выгорание.

Объектом исследования является ядерный реактор типа ВВЭР тепловой мощностью 1500 МВт с топливом UO_2 и обогащением 4 %.

Цель работы – нейтронно-физический расчёт реактора типа ВВЭР, состоящий в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров, удовлетворяющих поставленным требованиям.

В процессе исследования проводились расчёты параметров реактора по известным соотношениям с использованием программного обеспечения.

В результате исследования проведен нейтронно-физический расчёт реактора одногрупповым методом, и многогрупповым с использованием программного комплекса WIMS-D5B, также проведен расчет эффектов отравления реактора ксеноном и самарием.

Основные конструктивные технологические и технико-эксплуатационные характеристики: реактор типа ВВЭР, тепловая мощность – 1500 МВт, ядерное топливо – UO_2 , обогащение 4 %, теплоноситель – вода, твэлы – стержневые с наружным охлаждением, материал оболочек твэлов и кассет – сталь марки 1X18H9T, температура теплоносителя на входе в активную зону – 260 °С, на выходе – 280 °С.

Область применения: ядерная энергетика.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

Оглавление

Введение.....	13
1 Обзор литературы	14
1.1 Конструкционные особенности.....	14
1.2 Ядерное топливо.....	16
2 Нейтронно-физический расчёт реактора	17
2.1 Предварительный расчёт.....	17
2.2 Расчёт ядерных концентраций.....	20
2.3 Расчёт гомогенных ядерных концентрации	22
2.4 Гомогенизация первого рода	23
2.5 Гомогенизация второго рода.....	25
2.6 Расчёт сечений.....	27
2.7 Расчёт коэффициента размножения в бесконечной среде.....	31
2.7.1 Расчёт коэффициента размножения на быстрых нейтронах	31
2.7.2 Расчёт коэффициента использования тепловых нейтронов	32
2.7.3 Расчёт вероятности избежать резонансного захвата	34
2.7.4 Расчёт выхода нейтронов на один поглощённый в топливе	35
2.8 Расчёт эффективного коэффициента размножения.....	35
2.9 Оптимизация параметров ячейки	37
2.10 Расчёт «горячего» реактора.....	38
2.11 Расчёт отравления реактора	44
2.11.1.1 Стационарное отравления реактора ксеноном.....	45
2.11.1.2 Нестационарное отравление Хе.....	47
2.11.2.1 Стационарное отравление самарием.....	49
2.11.2.2 Нестационарное отравление Sm.....	52
2.12 Расчёт в программе WIMS-D5B	53
2.12.1 Расчёт «холодного» реактора.....	53
2.12.2 Расчёт «горячего» реактора	54
2.12.3 Изменение нуклидного состава	55
2.12.4 Вклад в энерговыделение различных нуклидов	57

2.13 Сравнение результатов расчёта	59
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	60
3.1 Организация и планирование работ	60
3.1.1 Продолжительность этапов работ	61
3.2 Потенциальные потребители результатов исследования	64
3.3 Анализ конкурентных технических решений и ресурсоэффективности	65
3.4 SWOT-анализ.....	67
3.5 Расчёт накопления готовности проекта	70
3.6 Расчёт сметы на выполнение проекта.....	72
3.6.1 Расчёт затрат на материалы	72
3.6.2 Расчёт заработной платы.....	73
3.6.3 Расчёт затрат на страховые взносы	74
3.6.4 Расчёт затрат на электроэнергию	74
3.6.5 Расчёт амортизационных расходов	75
3.6.6 Расчёт прочих расходов.....	76
3.6.7 Расчёт суммарной себестоимости разработки	77
3.6.8 Расчёт прибыли	77
3.6.9 Расчёт НДС	77
3.6.10 Цена разработки проекта.....	78
4. Социальная ответственность	79
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	79
4.1.1 Правовые нормы трудового законодательства	79
4.1.2 Организация рабочего места исследователя	80
4.2 Производственная безопасность.....	82
4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в процессе исследования	82
4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя.....	86
4.3 Экологическая безопасность.....	88
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	90

Заключение	92
Список использованных источников	94
Приложение А	98
Приложение Б.....	99
Приложение В.....	100

Введение

В настоящее время атомная энергетика не стоит на месте, количество новых строящихся и проектирующихся ядерных реакторов возрастает.

Для оценки возможности создания рабочего реактора, оценки работоспособности спроектированного реактора и оценки безопасности установки необходимо производить нейтронно-физические и теплогидравлические расчёты. Таким образом, в настоящее время актуальной задачей является проведение нейтронно-физического расчёта реактора.

Целью работы является проведение нейтронно-физического расчёта реактора типа ВВЭР. Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

- тепловой расчет ядерного реактора;
- нейтронно-физический расчет «холодного» и «горячего» состояния реактора;
- расчет отравления реактора;
- расчет в программном комплексе WIMS-D5.

1 Обзор литературы

1.1 Конструкционные особенности

Реактор ВВЭР-1000 является энергетическим реактором корпусного типа и работает на тепловых нейтронах. В качестве теплоносителя и замедлителя в данном реакторе используется вода.

Корпус реактора представляет собой вертикальный цилиндр, имеющий цилиндрическое днище. Внутри корпуса размещены активная зона и внутрикорпусные устройства. В состав корпуса входят: фланец, зона патрубков, опорная обечайка, цилиндрическая часть и эллиптические днище. Фланец и все обечайки выполняются цельноковаными, а днище — штампуется из заготовки. В верхней части корпуса располагаются патрубки, необходимые для подвода и отвода теплоносителя. Патрубки расположены в два ряда по вертикали [1]. Также в верхней части расположены патрубки для аварийного подвода теплоносителя при разгерметизации первого контура. Внутренняя поверхность корпуса полностью покрыта антикоррозийной наплавкой, имеющей толщину 7 – 9 мм.

Информация об изменении механических свойств и критической температуры хрупкости металлов корпуса из-за воздействия нейтронных потоков и высокой температуры получается путём использования специальных образцов-свидетелей. Изготовление заготовок для образцов свидетелей происходит одновременно с выполнением сварных стыков обечаек в районе активной зоны корпуса реактора. Заготовки выполняются теми же исполнителями, такими же методами и из того же материала, что и обечайка.

В верхнем блоке, имеющем в своём составе крышку, приводы шаговых электромеханизмов — ШЭМ, траверсу, дистанционирующую решётку, каркас и обечайку, размещаются органы управления и защиты реактора. Верхний блок предназначен также для создания замкнутого объема давления в реакторе.

Внутрикорпусная шахта предназначена для организации разделения входных и выходных потоков теплоносителя. В шахте также размещены

некоторые элементы активной зоны реактора. Шахта и выгородка представляют собой составную часть защиты металла корпуса реактора от воздействия нейтронных потоков и гамма-излучений, исходящих из активной зоны реактора. Шахта и выгородка также входят в состав железобетонного отражателя, где основным отражателем является теплоноситель первого контура – вода.

Формирование активной зоны реактора и дистанционирование периферийных кассет осуществляется с помощью выгородки. Снижая утечку нейтронов из активной зоны реактора, выгородка защищает корпус реактора от потоков нейтронов и гамма-излучения, что приводит к увеличению его ресурса. Выгородка также уменьшает протечку воды мимо активной зоны реактора. Выгородка представляет собой обечайку, которая состоит из кованых колец. Количество металла в обечайке выгородки имеет максимально возможное значения. Именно это обеспечивает эффективное снижение потока нейтронов, падающих на корпус реактора.

Корпус ядерного реактора окружает «сухая» защита, представляющая собой толстостенную цилиндрическую самонесущую стальную конструкцию, заполненную серпентинитовым бетоном [2].

Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) реактора ВВЭР-1000 – это трубка, которая заполняется таблетками двуокси урана. Трубка с обеих сторон герметично уплотняется концевыми деталями. Так как топливо при работе ядерного реактора набухает, между топливными таблетками и оболочкой (трубкой) предусмотрен зазор, а в центре топливной таблетки – отверстие [1].

Для производства оболочек ТВЭЛ используется рекристаллизованный сплав циркония, имеющим в своём составе 1 % ниобия. Этот сплав имеет малое поперечное сечением поглощения тепловых нейтронов и обладает высокой и стабильной коррозионной стойкостью в воде и паре высоких параметров и в других агрессивных средах [3]. Недостатком сплава является тот факт, что при температуре 1200 °С и выше интенсивно протекает парациркониевая реакция, а

в интервалах температур 400 – 500 °С наиболее интенсивно происходит химическое взаимодействие циркония с водой [3].

ТВЭЛ реактора ВВЭР-1000 объединяются в тепловыделяющие сборки (твс) по 312 ТВЭЛ в каждой ТВС. Объединение ТВЭЛ в ТВС обеспечивает размещение и надёжную работу органов регулирования, а также облегчает манипулирование топливом в процессе перегрузки. В ТВС предусмотрены 18 направляющих каналов для поглощающих стержней и 15 дистанцирующих решеток. Активная зона реактора ВВЭР-1000 состоит из 163 ТВС.

Рабочими органами регулирования являются объединённые в пучки поглощающие стержни, поглощающим элементом в которых является карбид бора. Каналами для органов регулирования оснащена каждая ТВС, однако органы регулирования устанавливаются только в 61 их 163 ТВС. ТВС, оснащённые органами регулирования, называются кластерами.

Для обеспечения экономически целесообразного КПД установка по генерации пара и турбина работают при температуре пара около 300 °С и при давлении порядка 7 МПа [4].

1.2 Ядерное топливо

Ядерным топливом в реакторе ВВЭР-1000 является диоксид урана, обогащённый по изотопу U^{235} . Стандартными обогащениями для реакторов ВВЭР-1000 являются 1,6 %, 2,0 %, 2,4 %, 3,0 %, 3,6 %, 4,0 %, 4,4 % и 5 %. Двоокись урана является керамическим материалом, что обуславливает её очень низкую теплопроводность и высокую температуру плавления, которая имеет значение порядка 2900 °С.

Диоксид урана позволяет удерживать до 98% радиоактивных продуктов деления, которые образуются в течение кампании реактора. Таким образом, матрица диоксида урана является первым физическим барьером, который препятствует выходу радиоактивных материалов в окружающую среду. Вторым физическим барьером является оболочка ТВЭЛ [5].

2 Нейтронно-физический расчёт реактора

2.1 Предварительный расчёт

Для проведения нейтронно-физического расчёта реактора необходимо определить объём его активной зоны, который будет обеспечивать требуемый для нормальной работы теплосъём.

Объём активной зоны рассчитывается исходя из требуемой мощности и реактора и его средней удельной объёмной нагрузкой:

$$V_{AZ} = \frac{N}{\bar{N}_0} \cdot \eta \quad (0.0.1)$$

где V_{AZ} – объём активной зоны;

N – заданная тепловая мощность реактора;

\bar{N}_0 – средняя по объёму нагрузка;

η – коэффициент увеличения активной зоны за счёт наличия СУЗ.

После нахождения объёма активной зоны реактора его диаметр и высота могут быть определены по следующим формулам:

$$D_{AZ} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{AZ}}{\pi \cdot m}}, \quad (0.0.2)$$

$$H_{AZ} = m \cdot D_{AZ}, \quad (0.0.3)$$

где D_{AZ} – диаметр активной зоны;

m – отношение высоты к диаметру активной зоны;

H_{AZ} – высота активной зоны.

Вследствие неравномерности распределения плотности потока нейтронов по активной зоне существует максимальное значение объёмной нагрузки в активной зоне. Это значение определяется следующей формулой:

$$N_{0_{\max}} = \bar{N}_0 \cdot k_V, \quad (0.0.4)$$

где k_V – объёмный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов.

Для определения максимально допустимой для заданного реактора тепловой нагрузки используется следующую формула:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{116 \cdot \Pi_0 \cdot n}, \quad (0.0.5)$$

где $S_{\text{яч}}$ – площадь элементарной ячейки, см²;

Π_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛ, см.

Площадь элементарной ячейки определяется формулой:

$$S_{\text{яч}} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{h_{\text{ТВЭЛ}}}{2} \right)^2. \quad (0.0.6)$$

Для нахождения периметра тепловыделяющей поверхности используется формула:

$$\Pi_0 = \pi \cdot D_{\text{ТВЭЛ}}. \quad (0.0.7)$$

Максимальная необходимая скорость прокачки теплоносителя определяется формулой:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{\text{АЗ}}}{3,6 \cdot k_z \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гор}} \cdot \Delta i \cdot S_{\text{мнс}}}, \quad (0.0.8)$$

где v – скорость прокачки теплоносителя;

k_z – осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

$S_{\text{мнс}}$ – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один ТВЭЛ, см²;

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гор}}$ – плотность воды при рабочих параметрах;

Δi – разность теплосодержания теплоносителя на входе и выходе, ккал/кг.

Разность теплосодержания определяется выражением:

$$\Delta i = C_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \quad (0.0.9)$$

где C_p – теплоёмкость теплоносителя при постоянном давлении, ккал/(кг·градус);

$t_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя на выходе;

t_{ex} – температура теплоносителя на входе.

Заданные параметры реактора, необходимые для проведения предварительного расчёта представлены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Необходимые для расчёта параметры реактора

Тепловая мощность реактора N	1500 МВт
Средняя тепловая нагрузка N_0	75 кВт/л
Отношение высоты к диаметру активной зоны m	1,1
Объёмный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов	2,5
Осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов k_z	1,5
Шаг расстановки ТВЭЛ $h_{ТВЭЛ}$	1,275 см
Диаметр ТВЭЛ $D_{ТВЭЛ}$	0,91 см
Теплоёмкость воды при 270 °С C_p	1,21 ккал/(кг·градус)
Плотность воды при 270 °С $\rho_{H_2O}^{zop}$	0,7679 г/л

Объём активной зоны равен:

$$V_{AZ} = \frac{N}{N_0} \cdot \eta = \frac{1500}{75} \cdot 1,1 = 22 \text{ м}^3.$$

Диаметр и высота активной зоны имеют значения:

$$D_{AZ} = \sqrt[3]{\frac{4V_{AZ}}{\pi m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 22}{\pi \cdot 1,1}} = 294,2 \text{ см.}$$

$$H_{AZ} = m \cdot D_{AZ} = 294,2 \cdot 1,1 = 323,6 \text{ см.}$$

Максимальное значение объёмной нагрузки составило:

$$N_{0_{\max}} = \bar{N}_0 \cdot k_v = 7,5 \cdot 2,5 = 187,5 \text{ кВт/л.}$$

Площадь ячейки равна:

$$S_{\text{яч}} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{h_{\text{ТВЭЛ}}}{2} \right)^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{1,275}{2} \right)^2 = 1,408 \text{ см}^2.$$

Периметр тепловыделяющей поверхности имеет значение:

$$P_0 = \pi \cdot D_{\text{ТВЭЛ}} = \pi \cdot 0,91 = 1,916 \text{ см}.$$

Максимальная тепловая нагрузка составила:

$$q_{\text{max}} = \frac{N_{0\text{max}} \cdot S_{\text{яч}}}{116 \cdot P_0} = \frac{187,5 \cdot 1,408}{116 \cdot 1,916} = 1,187 \text{ Гкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Разность теплосодержания теплоносителя на входе и выходе составила:

$$\Delta i = C_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,21 \cdot (280 - 260) = 24,2 \text{ ккал}/\text{кг}.$$

$$v = \frac{q_{\text{max}} \cdot P_0 \cdot H_{\text{Аз}}}{3,6 \cdot k_z \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{сop}} \cdot \Delta i \cdot S_{\text{mn}}} = \frac{1,187 \cdot 1,916 \cdot 323,6}{3,6 \cdot 2,5 \cdot 0,7679 \cdot 24,2 \cdot 0,757} = 9,689 \text{ м}/\text{с}.$$

Скорость прокачки теплоносителя соответствует допустимым нормам для реакторов типа ВВЭР ($v \leq 10 \text{ м}/\text{с}$).

2.2 Расчёт ядерных концентраций

Вычисление ядерных концентраций производят для каждого элемента активной зоны и отражателя. Ядерная концентрация находится по формуле:

$$N_i = \frac{N_A \cdot \rho}{A_i}, \quad (0.0.10)$$

где N_i – ядерная концентрация i -го элемента, ядер/ см^3 ;

N_A – число Авогадро, моль $^{-1}$;

ρ – плотность вещества, г/ см^3 ;

A_i – атомный вес i -го элемента, г/моль.

Если молекула вещества состоит из атомов различных элементов, то расчёт ядерных концентраций осуществляется по следующему принципу:

Сначала определяется молекулярная концентрация вещества:

$$N_{\text{мол}} = \frac{N_A \cdot \rho_{\text{вещ}}}{\mu_{\text{мол}}} \quad (0.0.11)$$

где $N_{\text{мол}}$ – молекулярная концентрация, молекул/ см^3 ;

$\mu_{\text{мол}}$ – молярная масса молекулы вещества, г/моль.

Затем определяется ядерная концентрация для каждого элемента, входящего в состав молекулы:

$$N_{\text{яд}}^i = n_i \cdot N_{\text{мол}} \quad (0.0.12)$$

где $N_{\text{яд}}^i$ – ядерная концентрация i -го элемента, ядер/см³;

n_i – количество атомов i -го элемента в одной молекуле вещества.

Ядерным топливом является диоксид урана (UO₂), обогащенный по U²³⁵ на 4 %. Ядерная концентрация топлива составила:

$$N_{\text{UO}_2} = \frac{N_A \cdot \rho_{\text{UO}_2}}{\mu_{\text{UO}_2}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,2}{270} = 2,275 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3$$

При расчёте концентрации отдельных элементов, входящих в состав топлива, были получены следующие значения:

$$N_{\text{U}^{235}} = N_{\text{UO}_2} \cdot C_{\text{U}^{235}} = 0,04 \cdot 2,275 \cdot 10^{22} = 9,101 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{\text{U}^{238}} = N_{\text{UO}_2} \cdot (1 - C_{\text{U}^{235}}) = (1 - 0,04) \cdot 2,275 \cdot 10^{22} = 2,184 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{\text{O}}^{\text{мол}} = 2 \cdot N_{\text{UO}_2} = 2 \cdot 2,275 \cdot 10^{22} = 4,55 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Теплоносителем и замедлителем является вода. Ядерные концентрации элементов теплоносителя равны:

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{N_A \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1}{18} = 3,346 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3.$$

$$N_{\text{H}} = 2 \cdot N_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot 3,346 \cdot 10^{22} = 6,692 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{\text{O}}^{\text{мол}} = N_{\text{H}_2\text{O}} = 3,346 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Материалом оболочек твэлов и кассет является сталь 1X18Н9Т. Сталь 1X18Н9Т имеет следующий состав [6]: железо – 70,7 %, марганец – 1,5 %, хром – 18 %, никель – 9 %, титан – 0,8 %. Ядерные концентрации всех элементов стали равны:

$$N_{\text{Fe}} = \frac{C_{\text{Fe}} \cdot N_A \cdot \rho_{\text{стали}}}{\mu_{\text{Fe}}} = \frac{0,707 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{56} = 6,045 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Cr} = \frac{C_{Cr} \cdot N_A \cdot \rho_{стали}}{\mu_{Cr}} = \frac{0,18 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{52} = 1,657 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Ni} = \frac{C_{Ni} \cdot N_A \cdot \rho_{стали}}{\mu_{Ni}} = \frac{0,09 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{59} = 7,304 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Mn} = \frac{C_{Mn} \cdot N_A \cdot \rho_{стали}}{\mu_{Mn}} = \frac{0,015 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{55} = 1,306 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Ti} = \frac{C_{Ti} \cdot N_A \cdot \rho_{стали}}{\mu_{Ti}} = \frac{0,008 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{48} = 7,98 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

В зазорах твэла находится гелий. Его ядерная концентрация равна:

$$N_{He} = \frac{N_A \cdot \rho_{He}}{\mu_{He}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,7846 \cdot 10^{-4}}{4} = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ ядер/см}^3.$$

2.3 Расчёт гомогенных ядерных концентрации

Гетерогенная элементарная ячейка данного реактора изображена на рисунке 2.3.1, где горизонтальной штриховкой обозначен замедлитель-теплоноситель (H_2O), заштрихованное кольцо большего диаметра – оболочка твэла (сталь), центральным отверстием и зазором между двумя кольцами – гелий, заштрихованное кольцо меньшего диаметра – топливо (UO_2).

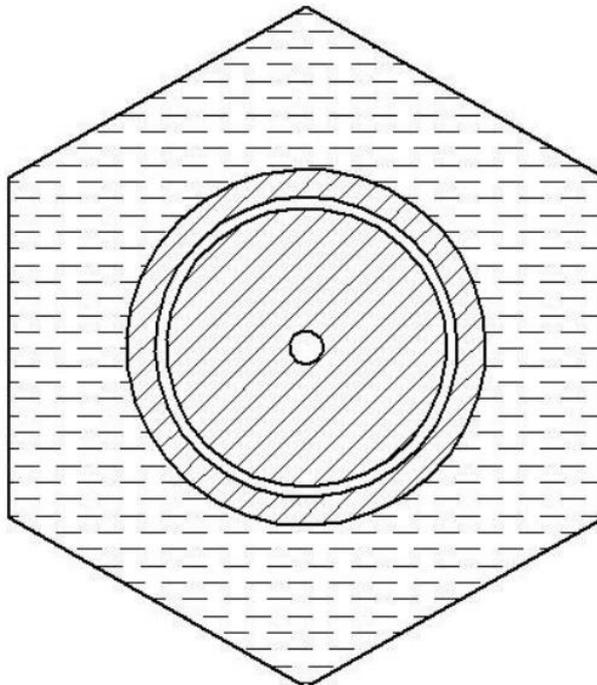


Рисунок 2.3.1 – Гетерогенная элементарная ячейка

Для расчёта необходимо провести гомогенизацию данной ячейки двумя способами.

Величины, необходимые для гомогенизации, представлены в таблице 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Необходимые для гомогенизации параметры

Внешний радиус твэл (оболочки) – $R_{ТВЭЛ}$.	0,455 см
Внутренний радиус твэл (топлива) – $r_{ТВЭЛ}$.	0,07 см
Внутренний радиус оболочки твэл – $r_{обол}$.	0,39 см
Внешний радиус топлива – $R_{топл}$.	0,3765 см
Площадь сечения твэл – $S_{ТВЭЛ}$	0,65 см
Площадь сечения замедлителя-теплоносителя – $S_{зам}$	0,757 см
Площадь сечения ячейки – $S_{яч}$	1,408 см

2.4 Гомогенизация первого рода

Для проведения гомогенизации первого рода необходимо заменить гетерогенную элементарную ячейку на гомогенизированную, в которой все компоненты гетерогенной элементарной ячейки будут находиться в виде однородной гомогенной смеси. Эскиз гомогенизированной ячейки представлен на рисунке 2.4.1.

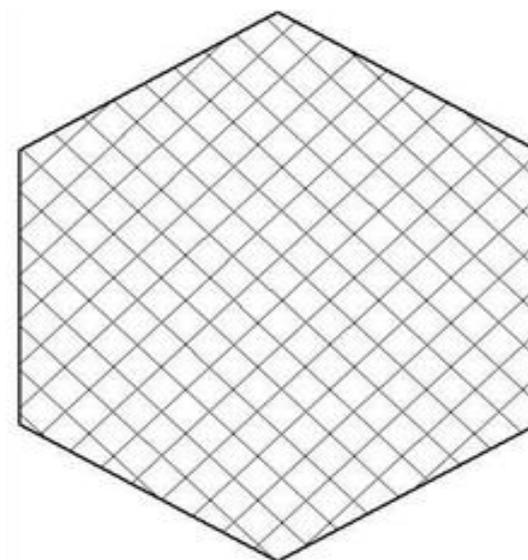


Рисунок 2.4.1 – Эскиз гомогенизированной элементарной ячейки

Ядерные концентрации в гомогенизированной ячейке находятся следующим образом:

$$N_i^{\Gamma} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{яч}} \quad (2.4.1)$$

где N_i – гетерогенная ядерная концентрация i -го элемента, ядер/см³;

S_i – площадь сечения i -го элемента в элементарной ячейке, см².

Для расчёта концентраций для гомогенизированной ячейки был проведён расчёт площадей, занимаемых компонентами в гетерогенной ячейке:

$$S_{мон} = \pi(R_{монл}^2 - r_{ТВЭЛ}^2) = 3,14 \cdot (0,3765^2 - 0,07^2) = 0,43 \text{ см}^2.$$

$$S_{об} = \pi(R_{ТВЭЛ}^2 - r_{обол}^2) = 3,14 \cdot (0,455^2 - 0,39^2) = 0,173 \text{ см}^2.$$

$$S_{He} = \pi(r_{обол}^2 - R_{мон}^2) + \pi \cdot r_{твэл}^2 = 3,14 \cdot (0,39^2 - 0,3765^2) + 3,14 \cdot 0,07^2 = 0,048 \text{ см}^2.$$

Ядерные концентрации топлива после гомогенизации первого рода будут равны:

$$N_{U^{235}}^{\Gamma} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{монл}}{S_{яч}} = \frac{9,101 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{1,408} = 2,779 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{U^{238}}^{\Gamma} = \frac{N_{U^{238}} \cdot S_{монл}}{S_{яч}} = \frac{2,184 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,408} = 6,671 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{O}^{\Gamma_{монл}} = \frac{N_{O}^{монл} \cdot S_{монл}}{S_{яч}} = \frac{4,55 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,408} = 1,390 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Ядерные концентрации для материалов оболочки после гомогенизации первого рода примут значения:

$$N_{Fe}^{\Gamma} = \frac{N_{Fe} \cdot S_{обол}}{S_{яч}} = \frac{6,045 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{1,408} = 7,409 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Cr}^{\Gamma} = \frac{N_{Cr} \cdot S_{обол}}{S_{яч}} = \frac{1,657 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{1,408} = 2,032 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Ni}^{\Gamma} = \frac{N_{Ni} \cdot S_{обол}}{S_{яч}} = \frac{7,304 \cdot 10^{21} \cdot 0,173}{1,408} = 8,952 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Mn}^{\Gamma} = \frac{N_{Mn} \cdot S_{обол}}{S_{яч}} = \frac{1,306 \cdot 10^{21} \cdot 0,173}{1,408} = 1,601 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Ti}^{\Gamma} = \frac{N_{Ti} \cdot S_{обол}}{S_{яч}} = \frac{7,98 \cdot 10^{20} \cdot 0,173}{1,408} = 9,781 \cdot 10^{19} \text{ ядер/см}^3.$$

Ядерные концентрации для элементов замедлителя-теплоносителя после гомогенизации первого рода будут равны:

$$N_H^{\Gamma} = \frac{N_H \cdot S_{зам}}{S_{яч}} = \frac{6,692 \cdot 10^{22} \cdot 0,757}{1,408} = 3,6 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_O^{\Gamma_{минс}} = \frac{N_O^{минс} \cdot S_{зам}}{S_{яч}} = \frac{3,346 \cdot 10^{22} \cdot 0,757}{1,408} = 1,8 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Ядерная концентрация гелия после гомогенизации первого рода будет равна:

$$N_{He}^{\Gamma} = \frac{N_{He} \cdot S_{He}}{S_{яч}} = \frac{2,687 \cdot 10^{19} \cdot 0,048}{1,408} = 9,143 \cdot 10^{17} \text{ ядер/см}^3.$$

2.5 Гомогенизация второго рода

В данном случае необходимо разделить гетерогенную элементарную ячейку на две гомогенизированные зоны: замедлитель и фиктивный блок. Эскиз данной конфигурации ячейки представлен на рисунке 2.5.1.

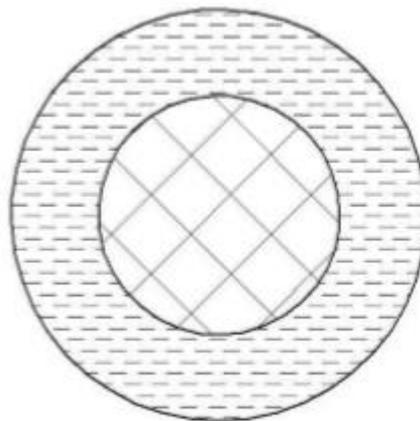


Рисунок 2.5.1 – Фиктивный блок, окруженный замедлителем

При этом площадь сечения и радиус фиктивного блока равны площади сечения и радиусу твэл соответственно.

Ядерные концентрации элементов фиктивного блока будут рассчитываться следующим образом:

$$N_i^{\text{ф.б.}} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{\text{ТВЭЛ}}} \quad (2.5.1)$$

Тогда ядерные концентрации элементов фиктивного блока будут равны:

$$N_{U^{235}}^{\text{ф.б.}} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{\text{топл}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{9,101 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{0,65} = 6,016 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{U^{238}}^{\text{ф.б.}} = \frac{N_{U^{238}} \cdot S_{\text{топл}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{2,184 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 1,444 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_O^{\text{ф.б.топл}} = \frac{N_O^{\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{4,55 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 3,008 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Fe}^{\text{ф.б.}} = \frac{N_{Fe} \cdot S_{\text{обол}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{6,045 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{0,65} = 1,604 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Cr}^{\text{ф.б.}} = \frac{N_{Cr} \cdot S_{\text{обол}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{1,657 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{0,65} = 4,397 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Ni}^{\text{ф.б.}} = \frac{N_{Ni} \cdot S_{\text{обол}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{7,304 \cdot 10^{21} \cdot 0,173}{0,65} = 1,938 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Mn}^{\text{ф.б.}} = \frac{N_{Mn} \cdot S_{\text{обол}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{1,306 \cdot 10^{21} \cdot 0,173}{0,65} = 3,465 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{Ti}^{\text{ф.б.}} = \frac{N_{Ti} \cdot S_{\text{обол}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{7,98 \cdot 10^{20} \cdot 0,173}{0,65} = 2,117 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{He}^{\text{ф.б.}} = \frac{N_{He} \cdot S_{He}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{2,687 \cdot 10^{19} \cdot 0,048}{0,65} = 1,979 \cdot 10^{18} \text{ ядер/см}^3.$$

Ядерные концентрация для второй зоны – зоны замедлителя, будут определяться следующим образом:

$$N_i^{\text{ф.б.}} = \frac{N_i \cdot S_{\text{зам}}}{S_{\text{зам}}} = N_i \quad (2.5.2)$$

Таким образом, ядерные концентрации элементов замедлителя-теплоносителя после гомогенизации второго рода будут равны ядерным концентрациям элементов замедлителя-теплоносителя в гетерогенной ячейке.

2.6 Расчёт сечений

Необходимость обработки сечений связана с тем, что их значения, приведённые в справочниках, относятся к энергии нейтронов $E = 0,0253$ эВ, соответствующей при распределении нейтронов по спектру Максвелла наиболее вероятной скорости $v = 2200$ м/с.

При нейтронно-физических расчётах все поперечные сечения должны быть отнесены к средней скорости нейтронов. Следует отметить, что спектр Максвелла для тепловых нейтронов постепенно переходит в спектр замедляющихся нейтронов при температуре 293 К при энергии примерно равной $E = 0,2$ эВ, называемой энергией сшивки.

В реальных средах распределение тепловых нейтронов не совпадает в точности с распределением Максвелла, поскольку имеет место поглощение тепловых нейтронов, в следствии чего спектр сдвигается в область больших энергий.

Для удобства расчётов в теории реакторов принято, что тепловые нейтроны распределены по спектру Максвелла, но имеют более высокую эффективную температуру – температуру нейтронного газа $T_{НГ}$, которая превышает температуру замедлителя. Поперечные сечения поглощения и деления, отнесённые к средней скорости тепловых нейтронов, определяются по формулам:

$$\sigma_a = \sigma_{a0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{НГ}}}, \quad (2.6.1)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{НГ}}}, \quad (2.6.2)$$

где σ_{a0} и σ_{f0} – табличные значения сечений поглощения и деления соответственно;

f_a и f_f – поправочные коэффициенты, учитывающие отклонение сечений поглощения и деления от закона $1/v^2$.

В тепловых реакторах температура нейтронного газа превышает температуру среды на 50–100 градусов. Для расчёта примем $T_{HG} = 393 \text{ К}$.

Микроскопические сечения рассеяния практически не зависят от энергии тепловых нейтронов, поэтому для них можно непосредственно воспользоваться табличными данными.

Макроскопические поперечные сечения вычисляются следующим образом:

$$\Sigma_i^k = \sigma_i^k \cdot N_k, \quad (2.6.3)$$

где Σ_i – макроскопическое сечение i -го взаимодействия для k -го элемента;
 σ_i – микроскопическое сечение i -го взаимодействия для k -го элемента;
 N_k – ядерная концентрация k -го элемента.

Транспортное микроскопическое сечение определяется следующим образом:

$$\sigma_{tr} = \sigma_a + \sigma_{in} + \sigma_{el} \cdot (1 - \mu_e). \quad (2.6.4)$$

Макроскопические сечения для вещества определяется следующим образом:

$$\Sigma_i = \sum_{k=1}^m \Sigma_i^k, \quad (2.6.5)$$

где Σ_i^k – макроскопическое сечение i -го взаимодействия для k -го элемента, входящего в состав вещества, имеющего в своём составе m элементов.

Замедляющую способность вещества можно оценить по соотношению:

$$\xi \Sigma_s^k = \sum_{k=1}^m \xi_k \cdot \Sigma_s^k, \quad (2.6.6)$$

где ξ_k – логарифмический декремент k -го элемента.

Логарифмический декремент связан с атомной массой элемента следующим образом:

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \cdot \ln \left(\frac{A-1}{A+1} \right) \quad (2.6.7)$$

Для определения логарифмического декремента у ядер с $A \geq 3$ можно с хорошим приближением пользоваться формулой:

$$\xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \quad (2.6.8)$$

Логарифмический декремент смеси определяется соотношением:

$$\xi = \frac{\sum_{k=1}^m \xi_k \cdot \Sigma_s^k}{\sum_{k=1}^m \Sigma_s^k} \quad (2.6.9)$$

Из-за сильных химических связей между атомами кислорода и водорода в молекуле воды расчёт макроскопических сечений для воды усложняется, поэтому для расчёта принято брать следующие экспериментальные значения: $\Sigma_a^{H_2O} = 0,0221 \text{ см}^{-1}$, $\Sigma_s^{H_2O} = 2,67 \text{ см}^{-1}$, $\Sigma_{tr}^{H_2O} = 2,31 \text{ см}^{-1}$, $\xi_{\Sigma_s^{H_2O}} = 1,35 \text{ см}^{-1}$.

Согласно формулам (2.6.1 – 2.6.9) был проведён расчёт сечений для урана-235 [7]:

$$\sigma_{a0}^{U^{235}} = 683 \text{ барн} - \text{табличное значение сечения поглощения } U^{235}.$$

$$\sigma_{f0}^{U^{235}} = 582 \text{ барн} - \text{табличное значение сечения деления } U^{235}.$$

$$\sigma_e^{U^{235}} = 15 \text{ барн} - \text{табличное значение сечения рассеяния } U^{235}.$$

$$\sigma_c^{U^{235}} = 101 \text{ барн} - \text{табличное значение сечения захвата } U^{235}.$$

$$f_a = 0,96.$$

$$f_f = 0,96.$$

$$\mu_e^{U^{235}} = 0.$$

$$\sigma_a^{U^{235}} = \sigma_{a0}^{U^{235}} \cdot 0,884 \cdot f_a^{U^{235}} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{HG}}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 500,474 \text{ барн}.$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = \sigma_{f0}^{U^{235}} \cdot 0,884 \cdot f_f^{U^{235}} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{HG}}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 426,466 \text{ барн}.$$

$$\sigma_s^{U^{235}} = \sigma_e^{U^{235}} + \sigma_{in}^{U^{235}} = 15 + 0 = 15 \text{ барн}.$$

$$\sigma_{tr}^{U^{235}} = \sigma_a^{U^{235}} + \sigma_{in}^{U^{235}} + \sigma_{el}^{U^{235}} \cdot (1 - \mu_e^{U^{235}}) = 500,474 + 15 \cdot (1 - 0) = 515,474 \text{ барн.}$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = \sigma_a^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}} = 500,474 \cdot 10^{-24} \cdot 9,101 \cdot 10^{20} = 0,456 \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_f^{U^{235}} = \sigma_f^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}} = 426,466 \cdot 10^{-24} \cdot 9,101 \cdot 10^{20} = 0,388 \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = \sigma_s^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 9,101 \cdot 10^{20} = 1,365 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = \sigma_{tr}^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}} = 511,076 \cdot 10^{-24} \cdot 9,101 \cdot 10^{20} = 0,469 \text{ см}^{-1}.$$

Так как $A_{U^{235}} = 235 \geq 3$, то для расчёта логарифмического декремента можно воспользоваться формулой (2.6.8):

$$\xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 8,487 \cdot 10^{-3}.$$

Тогда замедляющая способность U^{235} будет равна:

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = \xi \cdot \Sigma_s^{U^{235}} = 8,487 \cdot 10^{-3} \cdot 1,365 \cdot 10^{-2} = 1,159 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_a^{U^{235}\Gamma} = \sigma_a^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}}^\Gamma = 500,474 \cdot 10^{-24} \cdot 2,779 \cdot 10^{20} = 0,139 \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_f^{U^{235}\Gamma} = \sigma_f^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}}^\Gamma = 426,466 \cdot 10^{-24} \cdot 2,779 \cdot 10^{20} = 0,119 \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_s^{U^{235}\Gamma} = \sigma_s^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}}^\Gamma = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 2,779 \cdot 10^{20} = 0,417 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}\Gamma} = \sigma_{tr}^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}}^\Gamma = 515,474 \cdot 10^{-24} \cdot 2,779 \cdot 10^{20} = 0,143 \text{ см}^{-1}.$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}\Gamma} = \xi \cdot \Sigma_s^{U^{235}\Gamma} = 8,487 \cdot 10^{-3} \cdot 0,417 \cdot 10^{-2} = 3,538 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_a^{U^{235}\phi.б.} = \sigma_a^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}}^{\phi.б.} = 500,474 \cdot 10^{-24} \cdot 6,016 \cdot 10^{20} = 0,301 \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_f^{U^{235}\phi.б.} = \sigma_f^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}}^{\phi.б.} = 426,466 \cdot 10^{-24} \cdot 6,016 \cdot 10^{20} = 0,257 \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_s^{U^{235}\phi.б.} = \sigma_s^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}}^{\phi.б.} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 6,016 \cdot 10^{20} = 0,902 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}\phi.б.} = \sigma_{tr}^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}}^{\phi.б.} = 515,474 \cdot 10^{-24} \cdot 6,016 \cdot 10^{20} = 0,310 \text{ см}^{-1}.$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}\phi.б.} = \xi \cdot \Sigma_s^{U^{235}\phi.б.} = 8,487 \cdot 10^{-3} \cdot 0,902 \cdot 10^{-2} = 7,659 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

Для остальных элементов сечения рассчитываются аналогичным образом. Результаты расчётов представлены в таблице А.1 приложения А.

2.7 Расчёт коэффициента размножения в бесконечной среде

2.7.1 Расчёт коэффициента размножения на быстрых нейтронах

Расчёт коэффициента размножения на быстрых нейтронах для тесных решёток осуществляется следующим образом [8]:

$$\mu = \mu_{\text{бл}} + \frac{\mu_{\infty} - \mu_{\text{бл}}}{1 + 2,3 \cdot \frac{N_H}{N_{U^{238}}}}, \quad (2.7.1.1)$$

где $\mu_{\infty} = 1,19$;

$\frac{N_H}{N_{U^{238}}}$ – отношение числа атомов водорода к числу атомов урана в

активной зоне – уран-водное соотношение;

$\mu_{\text{бл}}$ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах для одиночного блока.

При расчете величины $\mu_{\text{бл}}$ для стержневых и трубчатых ТВЭЛ можно воспользоваться формулой [8]:

$$\mu_{\text{бл}} = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P}, \quad (2.7.1.2)$$

где $P = 0,8$ для данной конфигурации ТВЭЛ.

С учётом известных значений:

$$\mu_{\text{бл}} = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,08}{1 - 0,52 \cdot 0,08} = 1,008.$$

Уран-водное соотношение имеет значение:

$$\begin{aligned} \frac{N_H}{N_{U^{238}}} &= 2 \cdot \frac{V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot 238}{V_{UO_2} \cdot \rho_{UO_2} \cdot (1 - C_{U^{235}}) \cdot 18} = 2 \cdot \frac{S_{H_2O} \cdot H_{АкЗ} \cdot \rho_{H_2O} \cdot 238}{S_{UO_2} \cdot H_{АкЗ} \cdot \rho_{UO_2} \cdot (1 - C_{U^{235}}) \cdot 18} = \\ &= 2 \cdot \frac{S_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot 238}{S_{UO_2} \cdot \rho_{UO_2} \cdot (1 - C_{U^{235}}) \cdot 18} = 2 \cdot \frac{0,757 \cdot 1 \cdot 238}{0,43 \cdot 10,2 \cdot (1 - 0,02) \cdot 18} = 4,661. \end{aligned}$$

С учётом известных величин значение коэффициента размножения на быстрых нейтронах составило:

$$\mu = \mu_{\text{бл}} + \frac{\mu_{\infty} - \mu_{\text{бл}}}{1 + 2,3 \cdot \frac{N_H}{N_{U^{238}}}} = 1,008 + \frac{1,19 - 1,008}{1 + 2,3 \cdot 4,661} = 1,023.$$

2.7.2 Расчёт коэффициента использования тепловых нейтронов

Для расчёта данного коэффициента используется вид гомогенизации, при котором гетерогенная ячейка заменяется двузонной, состоящей из гомогенизированного блока замедлителя и гомогенизированного блока топлива – фиктивного блока.

Расчёт θ в этом случае ведут в два этапа. Сначала определяют величину $\theta'_{\text{ф.б.}}$, представляющую собой отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов [8]:

$$\theta'_{\text{ф.б.}} = \frac{1}{1 + F \cdot \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_a^{H_2O}}{S_{\text{ф.б.}} \cdot \Sigma_a^{\text{ф.б.}}} + (E - 1)}. \quad (2.7.2.1)$$

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования F определяется следующим образом [8]:

$$F = \frac{\bar{\Phi}_{\text{зам}}}{\bar{\Phi}_{\text{ф.б.}}} = \frac{R_{\text{ф.б.}}}{2 \cdot L_{\text{ф.б.}}} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)}{I_1\left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)}, \quad (2.7.2.2)$$

где I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно.

Коэффициент $(E - 1)$, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе, определяется соотношением [8]:

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{зам}}}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right) - 0,75\right). \quad (2.7.2.3)$$

Затем рассчитывается коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\sum_a^{\text{топл.ф.б.}}}{\sum_a^{\text{ф.б.}}} \quad (2.7.2.4)$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов вычисляется следующим образом:

$$\theta = \theta_0 \cdot \theta'_{\text{ф.б.}} \quad (2.7.2.5)$$

Для расчёта θ необходимо определить длину диффузии в фиктивном блоке и в замедлителе для элементарной ячейки, прошедшей гомогенизацию второго рода. В общем случае длина диффузии определяется следующим образом:

$$L = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a \cdot \Sigma_{tr}}} \quad (2.7.2.5)$$

Длина диффузии в фиктивном блоке и в замедлителе для заданного реактора имеет значение:

$$L_{\text{ф.б.}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{ф.б.}} \cdot \Sigma_{tr}^{\text{ф.б.}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,384 \cdot 0,865}} = 1,002 \text{ см.}$$

$$L_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{H}_2\text{O ф.б.}} \cdot \Sigma_{tr}^{\text{H}_2\text{O ф.б.}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,0221 \cdot 2,31}} = 2,555 \text{ см.}$$

Коэффициент экранирования равен:

$$F = \frac{R_{\text{ф.б.}}}{2 \cdot L_{\text{ф.б.}}} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)}{I_1\left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)} = \frac{0,455}{2 \cdot 1,002} \cdot \frac{I_0\left(\frac{0,455}{1,002}\right)}{I_1\left(\frac{0,455}{1,002}\right)} = 1,026.$$

Коэффициент, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе, равен:

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left(\frac{0,669}{2,555}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{0,669}{1,002}\right) - 0,75\right) = -0,040.$$

Тогда отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов будет равно:

$$\theta'_{\phi.б.} = \frac{1}{1 + 1,026 \cdot \frac{0,757 \cdot 0,0221}{0,65 \cdot 0,384} - 0,040} = 0,972.$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока равен:

$$\theta_0 = \frac{\sum_a^{топл.ф.б.}}{\sum_a^{\phi.б.}} = \frac{0,331}{0,384} = 0,863.$$

Тогда коэффициент использования тепловых нейтронов будет иметь значение:

$$\theta = \theta_0 \cdot \theta'_{\phi.б.} = 0,863 \cdot 0,972 = 0,838.$$

2.7.3 Расчёт вероятности избежать резонансного захвата

Вероятность избежать резонансного захвата определяется следующим образом [8]:

$$\varphi = \exp \left[- \frac{k_T \cdot R_{топл} \cdot \sqrt{R_{\phi.б.} \cdot \mu_1} + 0,73 \cdot R_{топл}^2 \cdot \mu_1}{\xi \sum_s^{H_2O \phi.б.} \cdot S_{зам} + \xi \sum_s^{\phi.б.} \cdot S_{\phi.б.}} \right] \cdot \frac{\sum_a^{топл.ф.б.}}{\sum_a^{\phi.б.}}, \quad (2.7.3.1)$$

где k_T – температурный коэффициент.

Температурный коэффициент определяется следующим образом:

$$k_T = 0,775 \cdot \left(1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_{топл}} \right), \quad (2.7.3.2)$$

где $T_{топл}$ – температура топлива;

μ_1 – пористость по урану-238.

Пористость по урану-238 равна:

$$\mu_1 = \frac{N_{U^{238}}}{N_{U^{238}}^{нрп}}, \quad (2.7.3.3)$$

где $N_{U^{238}}^{нрп}$ – ядерная концентрация урана-238 для природного урана

Определим ядерную концентрацию урана-238 для природного урана [9]:

$$N_{U^{238}}^{нрп} = \frac{N_A \cdot \rho_{U^{нрп}} \cdot C_{U^{238}}^{нрп}}{\mu_{U^{238}}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 19,05 \cdot 0,9928}{238} = 4,786 \cdot 10^{22}.$$

Тогда пористость равна:

$$\mu_1 = \frac{N_{U^{238}}}{N_{U^{238}}^{прир}} = \frac{2,184 \cdot 10^{22}}{4,786 \cdot 10^{22}} = 0,456.$$

Температурный коэффициент с учётом температуры топлива 293 К равен:

$$k_T = 0,775 \cdot \left(1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{293}\right) = 1,007.$$

Тогда вероятность избежать резонансного захвата будет равна:

$$\varphi = \exp\left[-\frac{1,007 \cdot 0,3765 \cdot \sqrt{0,455 \cdot 0,466} + 0,73 \cdot 0,3765^2 \cdot 0,456}{1,35 \cdot 0,757 + 0,023 \cdot 0,65}\right] \cdot \frac{0,331}{0,384} = 0,776.$$

2.7.4 Расчёт выхода нейтронов на один поглощённый в топливе

Коэффициент η показывает выход нейтронов, приходящихся на один поглощённый топливом нейтрон [11].

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\sum_f^{топл}}{\sum_a^{топл}}, \quad (2.7.4.1)$$

Так как горючим в реакторе является уран-235 и $\nu_f^{U^{235}} = 2,42$, то:

$$\eta = 2,42 \cdot \frac{0,398}{0,501} = 1,876.$$

Коэффициент размножения в бесконечной среде рассчитывается следующим образом [12]:

$$k_\infty = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta, \quad (2.7.4.1)$$

Подставляя ранее найденные значения, получим:

$$k_\infty = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta = 1,023 \cdot 0,838 \cdot 0,739 \cdot 1,876 = 1,248.$$

2.8 Расчёт эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения определяется соотношением:

$$k_{эфф} = k_\infty \cdot P = k_\infty \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2}, \quad (2.8.1)$$

где B^2 – геометрический параметр;

τ_p – возраст нейтронов;

P – вероятность избежать утечки;

L_p^2 – квадрат длины диффузии в решётке.

Квадрат длины диффузии в решётке определяется следующим образом:

$$L_p^2 = L_{зам}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{ф.б.}^2 \cdot \theta. \quad (2.8.2)$$

Подставив известные значения, получим для квадрата длины диффузии в решётке:

$$L_p^2 = 2,555^2 \cdot (1 - 0,838) + 1,002^2 \cdot 0,838 = 1,899 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов уран-водной решётке определяется экспериментальной формулой С. М. Фейнберга [8]:

$$\tau_p = \tau_{зам} \sqrt{\left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)}, \quad (2.8.3)$$

где $\tau_{зам} = 27,3 \text{ см}^2$ – возраст нейтронов в замедлителе.

Возраст нейтронов в решётке равен:

$$\tau_p = 27,3 \sqrt{\left(\frac{1,408}{0,757} \right)} = 37,219 \text{ см}^2.$$

Геометрический параметр определяется соотношением:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H_{A3} + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R_{A3} + \delta} \right)^2, \quad (2.8.4)$$

где δ – эффективная добавка за счёт отражателя.

Эффективная добавка за счёт отражателя для ВВЭР с водным отражателем определяется следующим образом:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40), \quad (2.8.5)$$

где M^2 – площадь миграции в отражателе.

Определим площадь миграции в отражателе:

$$M^2 = \tau_{зам} + L_{зам}^2 = 27,3 + 2,555^2 = 33,829 \text{ см}^2.$$

Тогда эффективная добавка равна:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (33,829 - 40) = 6,583 \text{ см.}$$

С помощью найденного значения эффективной добавки определим значение геометрического параметра:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{3,236 + 2 \cdot 6,583} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{1,471 + 6,583} \right)^2 = 3,319 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}.$$

С учётом найденных значений эффективный коэффициент размножения будет равен:

$$k_{эфф} = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2} = 1,248 \cdot \frac{\exp(-3,319 \cdot 10^{-4} \cdot 37,219)}{1 - 3,319 \cdot 10^{-4} \cdot 1,899} = 1,232.$$

2.9 Оптимизация параметров ячейки

Для определения оптимальных параметров ячейки необходимо определить k_{∞} при изменяющихся параметрах ячейки.

Для оптимизации шага расстановки твэл $h_{ТВЭЛ}$ варьировалось его значение при остальных неизменных параметрах с шагом 0,075 см. Полученная зависимость k_{∞} от $h_{ТВЭЛ}$ представлена на рисунке 2.9.1.

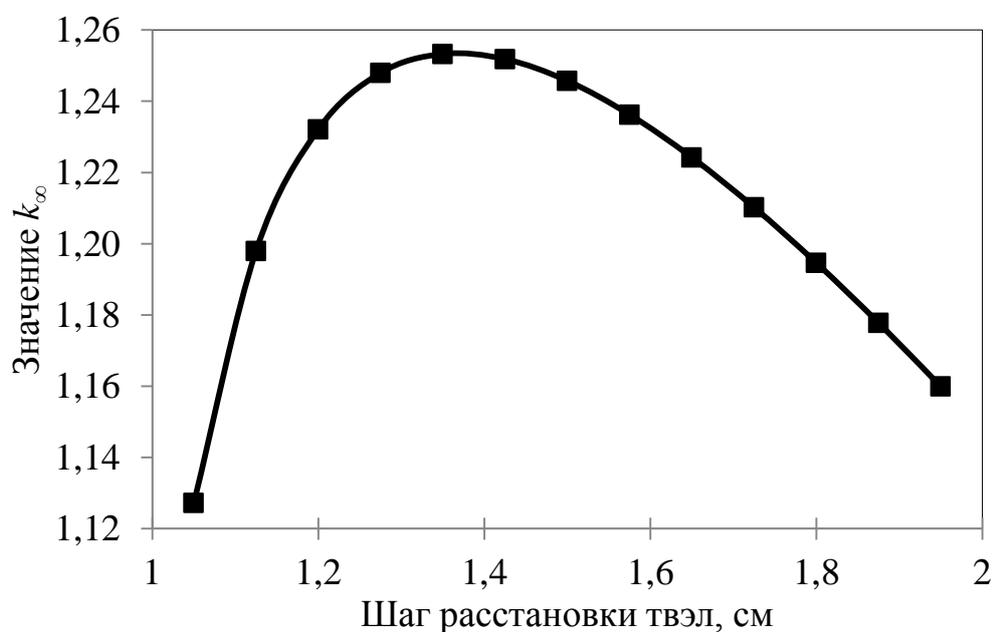


Рисунок 2.9.1 – Зависимость k_{∞} от $h_{ТВЭЛ}$

Наибольшее значение k_{∞} достигается при $h_{ТВЭЛ} = 1,275 \text{ см.}$

Для оптимизации радиуса топливной таблетки $R_{топл}$ варьировалось его значение (а также значения $r_{обол}$ и $R_{ТВЭЛ}$ соответственно) при $h_{ТВЭЛ} = 1,275$ см с шагом 0,05 см. Полученная зависимость представлена на рисунке 2.9.2.

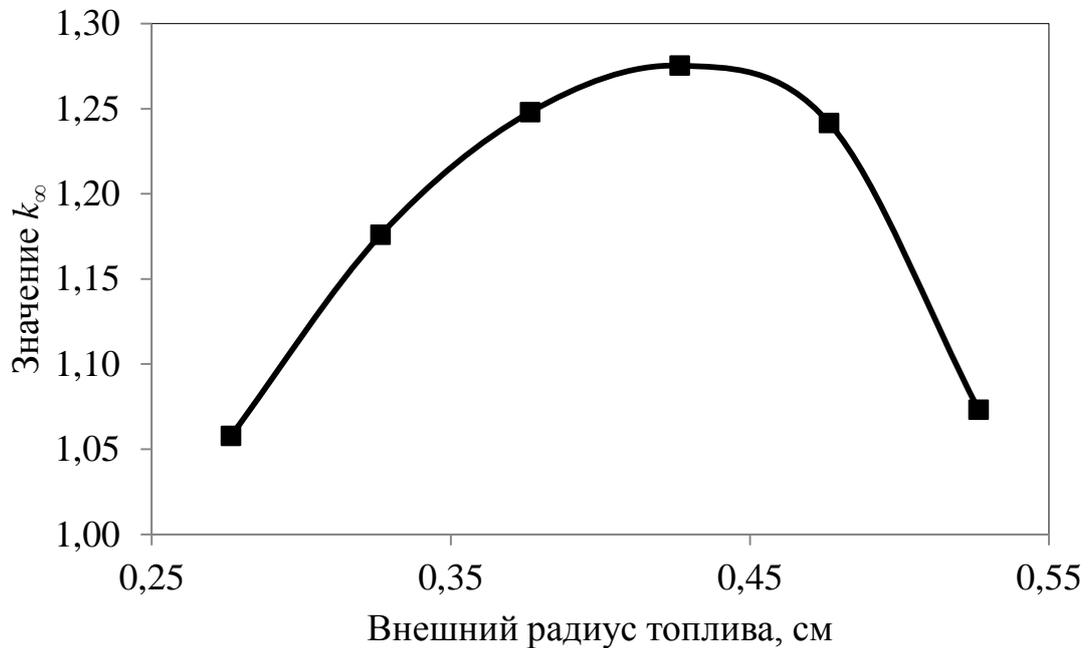


Рисунок 2.9.2 – Зависимость k_{∞} от $R_{топл}$

В ходе оптимизации были найдены наиболее оптимальные параметры ячейки $h_{ТВЭЛ} = 1,35$ см, $R_{топл} = 0,4265$ см.

2.10 Расчёт «горячего» реактора

Как известно, повышение температуры материала приводит к уменьшению его плотности. Температура материалов реактора при работе на мощности значительно увеличивается в сравнении с «холодным» состоянием. Так как от плотностей материалов зависят макроскопические, а от температуры нейтронного газа – микроскопические сечения поглощения и деления, нейтронно-физические параметры ядерного реактора в «горячем» состоянии будут отличаться от параметров в «холодном» состоянии.

Для описания изменения микроскопических сечений поглощения и деления при изменении температуры используются соотношения [8]:

$$\bar{\sigma}_a(T_{н.г}) = 0,886 \cdot \sigma_{a0} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}} \cdot f_a(T_{н.г}) \cdot F_a(\chi_{гр}), \quad (2.10.1)$$

$$\bar{\sigma}_f(T_{н.г.}) = 0,886 \cdot \sigma_{f0} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}} \cdot f_f(T_{н.г.}) \cdot F_f(\chi_{гр}), \quad (2.10.2)$$

где σ_{a0} и σ_{f0} – макроскопические сечения поглощения и деления соответственно для стандартных нейтронов;

$f_a(T_{н.г.})$ и $f_f(T_{н.г.})$ – поправочные коэффициенты, характеризующий отклонение сечения от закона $1/v$;

$T_{н.г.}$ – температура нейтронного газа, К.

Температура нейтронного газа рассчитывается по формуле [8]:

$$T_{эф}^{н.г.} = T_{зам} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{\bar{\Sigma}_{аяч.}}{\xi \cdot \bar{\Sigma}_{сяч.}} \right), \quad (2.10.3)$$

где $T_{зам}$ – средняя температура замедлителя.

Для проведения расчёта принимается, что средняя температура замедлителя равна средней температуре теплоносителя:

$$T_{зам} = \frac{T_{вх} + T_{вых}}{2} = \frac{260 + 280}{2} = 270 \text{ К.}$$

За границу тепловой группы у тепловых и промежуточных нейтронов принимается точка пересечения спектра Ферми и спектра Максвелла. Для нахождения этой точки используется трансцендентное уравнение [8]:

$$f(\chi_{гр}) = \frac{\chi_{гр}^2 \cdot e^{-\chi_{гр}}}{1 - (1 + \chi_{гр}) \cdot e^{-\chi_{гр}}} = \frac{\Sigma_a(E_{гр}, E_T)}{\xi \cdot \Sigma_s}, \quad (2.10.4)$$

где $\chi_{гр} = \frac{E_{гр}}{E_T}$.

Так же можно воспользоваться графическим методом. При этом методе используется последовательность, представленная ниже [8].

Сначала определяется температура нейтронного газа по формуле (2.10.3), затем выбирается пробное значение $\chi_{гр}$ и по нему из рисунка 2.10.1 определяется $F_a(\chi_{гр})$. После сечения пересчитываются по формулам (2.10.1) и (2.10.2) с учётом полученного значения $F_a(\chi)$. Затем пересчитываются $\bar{\Sigma}_{аяч.}$ и

$\xi \cdot \bar{\Sigma}_{сяч.}$ и по их новым значениям вычисляется $f(\chi_{гр})$ по формуле (2.10.4). По рассчитанному значению $f(\chi_{гр})$ из рисунка 2.10.2 определяется расчётное значение $\chi_{гр}$. При сильном различии пробного и расчётного значений $\chi_{гр}$ производится новый расчёт по описанному алгоритму, при этом температура нейтронного газа определяется с учётом рассчитанных ранее $\bar{\Sigma}_{аяч.}$ и $\xi \cdot \bar{\Sigma}_{сяч.}$.

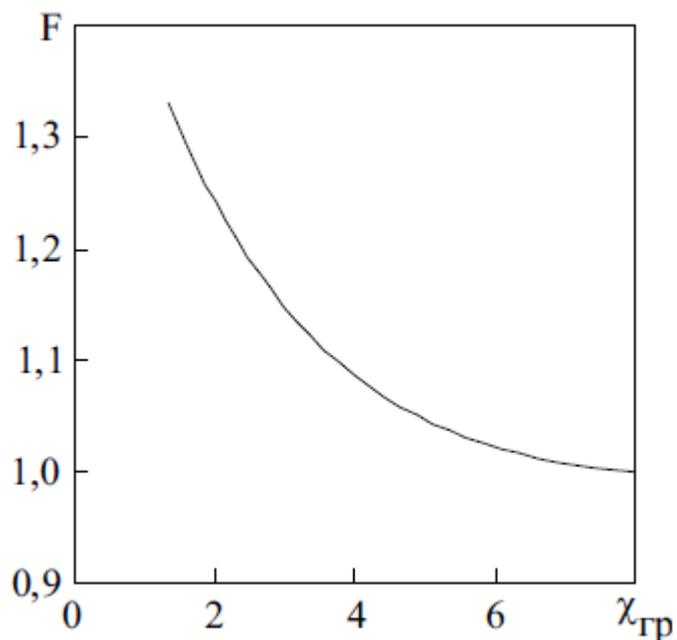


Рисунок 2.10.1 – К усреднению сечений по спектру Максвелла

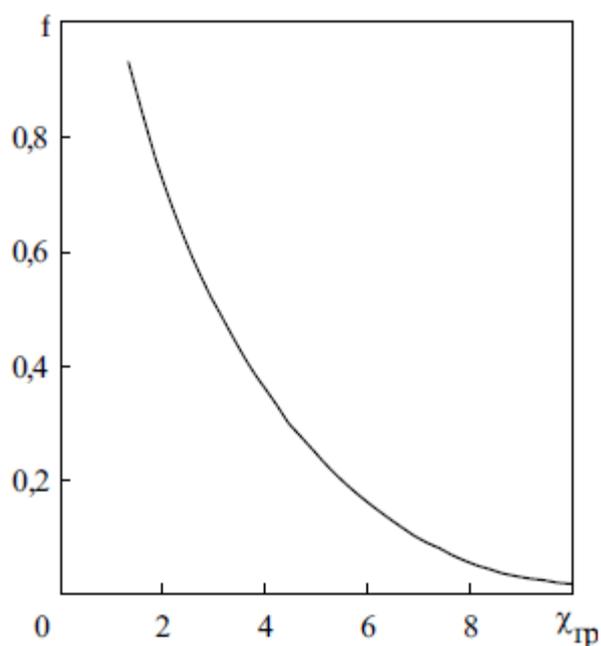


Рисунок 2.10.2 – Множество решений трансцендентного уравнения

Для проведения расчёта начальная температура нейтронного газа принималась равной средней температуре замедлителя $T_{зам}$. В качестве пробного значения было выбрано $\chi_{гр} = 6$. С учётом выбранных параметров были пересчитаны микроскопические сечения поглощения и деления по формулам (2.10.1) и (2.10.2) и рассчитаны средние значения $\bar{\Sigma}_a^{яч.}$ и $\xi \cdot \bar{\Sigma}_s^{яч.}$:

$$\bar{\Sigma}_a^{яч.} = \frac{\Sigma_a^{мон} \cdot S_{мон} + \Sigma_a^{зам} \cdot S_{зам} + \Sigma_a^{об} \cdot S_{об}}{S_{яч.}} = 0,159912548 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \cdot \bar{\Sigma}_s^{яч.} = \frac{\xi_{мон} \cdot \Sigma_s^{мон} \cdot S_{мон} + \xi_{зам} \cdot \Sigma_s^{зам} \cdot S_{зам} + \xi_{об} \cdot \Sigma_s^{об} \cdot S_{об}}{S_{яч.}} = 0,736966861 \text{ см}^{-1}.$$

По рассчитанным значениям $\bar{\Sigma}_a^{яч.}$ и $\xi \cdot \bar{\Sigma}_s^{яч.}$ было определено $f(\chi_{гр})$:

$$f(\chi_{гр.}) = \frac{\bar{\Sigma}_a^{яч.}}{\xi \cdot \bar{\Sigma}_s^{яч.}} = 0,217.$$

Из рисунка 2.10.2 для рассчитанного значения $f(\chi_{гр})$ было получено значение $\chi_{гр} = 5,3$. Из-за большой разницы между пробным и рассчитанным значением $\chi_{гр}$ необходимо провести уточнение.

После серии уточнений были определены необходимые для расчёта параметры: $f(\chi_{гр.}) = 0,191$; $F(\chi) = 1,02$; $T_{эф}^{н.г.} = 688,3$ К; $f_a(T_{н.г.}) = f_f(T_{н.г.}) = 0,933$.

Значения сечений поглощения и деления, рассчитанных с учётом найденных параметров, представлены в таблице 2.10.1.

Таблица 2.10.1 – Микроскопические сечения для «горячего» реактора

	U ²³⁵	U ²³⁸	O (Т)	H ₂ O	Zr	Nb
σ_a , барн	417,446	1,656	0,000	0,000	0,136	0,852
σ_f , барн	355,906	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Макроскопические сечения поглощения и деления для воды рассчитывались с учётом изменения её плотности при повышении температуры до 270 °С. Для твёрдых веществ из-за малого влияния температуры на изменение плотности этот эффект не учитывался.

Результаты расчёта коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде и коэффициентов формулы 4-х сомножителей «горячего» реактора представлены в таблице 2.10.2.

Таблица 2.10.2 – Сравнение параметров «холодного» и «горячего» реактора

Коэффициент	«Холодный» реактор	«Горячий» реактор
μ	1,02295	1,02324
φ	0,77587	0,77306
θ	0,83814	0,81908
η	1,87604	1,87112
k_{∞}	1,24795	1,21232

Согласно расчётам коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде в «горячем» состоянии имеет меньшее значение, чем в «холодном». Такой же эффект наблюдается и для трёх коэффициентов формулы 4-х сомножителей: φ , θ и η . Значение коэффициента μ наоборот возросло.

Эффективный коэффициент размножения «горячего» реактора определяется выражением:

$$k_{\text{эфф}}^{\text{гор}} = \frac{k_{\infty} \cdot e^{(-B^2 \cdot \tau_{\text{гор}})}}{1 + B^2 \cdot L_{\text{гор}}^2}. \quad (2.10.5)$$

Возраст нейтронов в уран-водной решётке определяется экспериментальной формулой С. М. Фейнберга:

$$\tau_{\text{гор}} = \frac{\tau_{\text{H}_2\text{O}}}{\left(\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гор}} \frac{S_{\text{H}_2\text{O}}}{S_{\text{яч}}} \right) \cdot \left(1 - \frac{S_{\text{H}_2\text{O}}}{S_{\text{яч}}} \cdot (1 - \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гор}}) \right)^{1,5}}, \quad (2.10.6)$$

где $\tau_{\text{H}_2\text{O}} = 27,3$ см – возраст нейтронов в воде;

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гор}}$ – плотность воды при рабочей температуре замедлителя.

Квадрат длины диффузии гетерогенной решетки реактора в «горячем» состоянии определяется так же, как и в «холодном» состоянии. Зависимость

квадрата длины диффузии в замедлителе от его температуры в «горячем» состоянии реактора имеет вид:

$$L_{зам}^2(T_{зам}) = L_{зам} \cdot \left(\frac{T_{зам}}{293} \right)^{0,48} \quad (2.10.7)$$

С учётом определённых ранее параметров было получено значение $L_{зам}^2(T_{зам})$:

$$L_{зам}^2(T_{зам}) = 2,555^2 \cdot \left(\frac{543}{293} \right)^{0,48} = 8,780.$$

С помощью рассчитанного значения длины диффузии замедлителя было определено значение длины диффузии для решётки:

$$L_p^2 = 8,780^2 \cdot (1 - 0,81908) + 1,222^2 \cdot 0,81908 = 15,169 \text{ см}^2.$$

Согласно формуле (2.10.6) было получено значение возраста нейтронов:

$$\tau_{зоп} = \frac{27,3}{\left(767,9 \cdot \frac{0,757}{1,408} \right) \cdot \left(1 - \frac{0,757}{1,408} \cdot (1 - 767,9) \right)^{1,5}} = 80,715 \text{ см}^2.$$

С помощью рассчитанных параметров было определено значение эффективного коэффициента размножения «горячего» реактора:

$$k_{эфф}^{зоп} = \frac{k_{\infty} \cdot e^{(-3,319 \cdot 10^{-4} \cdot 80,715)}}{1 + 3,319 \cdot 10^{-4} \cdot 15,169} = 1,174.$$

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.

Температурный коэффициент реактивности (ТКР) реактора при данной средней температуре теплоносителя – это изменение реактивности реактора при его разогреве на 1 °С сверх этой температуры [5].

Согласно рассчитанным значениям были получены величины ТЭР и ТКР реактора [11]:

$$\rho_T = \frac{k_{эфф}^{зор} - 1}{k_{эфф}^{зор}} - \frac{k_{эфф}^{хол} - 1}{k_{эфф}^{хол}} = \frac{1,17436 - 1}{1,17436} - \frac{1,23186 - 1}{1,23186} = -0,03975 \text{ отн. ед.}$$

$$\alpha = \frac{\rho_T}{\Delta T} = \frac{k_{эфф}^{зор} - k_{эфф}^{хол}}{T_{зам} - 293} = \frac{1,17436 - 1,23186}{543 - 293} = -2,3 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}.$$

Отрицательные значения ТЭР и ТКР позволяют сделать вывод о стабильной и безопасной работе реактора при разогреве.

2.11 Расчёт отравления реактора

В результате деления ядер урана и плутония образуются разнообразные ядра осколки деления и продукты их распада, которые принято делить на две группы. К первой группе относятся ядра Xe^{135} и Sm^{149} , имеющие большое сечение поглощения тепловых нейтронов. Уменьшение реактивности в результате накопления ядер Xe^{135} и Sm^{149} называется отравлением [12].

Отравление Xe^{135} имеет особо важное значение в переходных процессах.

Ко второй группе относятся стабильные и долгоживущие изотопы. Уменьшение реактивности реактора в результате накопления осколков деления второй группы называется шлакованием реактора.

Изотоп Sm^{149} является стабильным и должен быть отнесён к шлакам. Вследствие большого сечения поглощения и высокой концентрации Sm^{149} по характеру воздействия на реактивность приближается к Xe^{135} и рассматривается отдельно.

В настоящем пункте представлен расчёт эффектов отравления реактора изотопами Xe^{135} и Sm^{149} . Для расчёта эффектов отравления необходимо определить значение средней плотности потока нейтронов в реакторе.

Мощность реактора определяется выражением [11]:

$$N = \sum_f^{яч} \cdot E_f \cdot \Phi \cdot V_{топл}, \quad (3.1)$$

где E_f – средняя энергия деления (200 МэВ);

$V_{топл}$ – объём топлива;

$\sum_f^{яч}$ – макроскопическое сечение деления для ячейки;

Φ – средняя плотность потока нейтронов.

Тогда из формулы (3.1) средняя плотность потока нейтронов в реакторе равна:

$$\Phi = \frac{N}{\Sigma_f^{яч} \cdot E_f \cdot V_{топл}} = \frac{1500 \cdot 10^6}{0,089 \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5096761,22} = 2,39 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Необходимые для расчёта эффектов отравления константы представлены в таблице 2.11.1.

Таблица 2.11.1 – Параметры для расчёта эффектов отравления реактора

Нуклид	ω , ядро/акт деления	λ , с^{-1}	σ_a , см^2
^{135}I	0,056	$2,87 \cdot 10^{-5}$	0
^{135}Xe	0,003	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-18}$
^{149}Pm	0,013	$3,85 \cdot 10^{-6}$	0
^{149}Sm	0	-	$5,92 \cdot 10^{-20}$

2.11.1.1 Стационарное отравления реактора ксеноном

Стационарные концентрации ^{135}I и ^{135}Xe определяются выражениями [8]:

$$N_{cm}^I = \frac{\omega_I \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_I}. \quad (2.11.1.1)$$

$$N_{cm}^{Xe} = \frac{(\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi}. \quad (2.11.1.2)$$

С помощью данных из таблицы 2.11.1 и рассчитанного ранее значения Φ были определены значения стационарных концентраций ^{135}I и ^{135}Xe :

$$N_{cm}^I = \frac{0,056 \cdot 0,089 \cdot 2,39 \cdot 10^{13}}{2,87 \cdot 10^{-5}} = 4,16 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

$$N_{cm}^{Xe} = \frac{(0,056 + 0,003) \cdot 0,089 \cdot 2,39 \cdot 10^{13}}{2,11 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 2,39 \cdot 10^{13}} = 1,45 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

После пуска ядерного реактора начинается процесс наработки ядер йода и ксенона. Зависимости концентраций ядер йода и ксенона от времени работы реактора имеют следующий вид:

$$N_I(t) = N_{cm}^I \cdot (1 - e^{-\lambda_I t}). \quad (2.11.1.3)$$

$$N_{Xe}(t) = N_{cm}^{Xe} \cdot \left(1 - e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi)t}\right) - \frac{N_{cm}^I}{\frac{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_I} - 1} \cdot \left(e^{-\lambda_I t} - e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi)t}\right). \quad (2.11.1.1.4)$$

По формулам (2.11.1.1.3) и (2.11.1.1.4) был проведён расчёт концентраций для разных моментов времени работы ядерного реактора. По результатам расчёта были построены графики изменения ядерных концентраций во времени, представленные на рисунке 2.11.1.1.1.

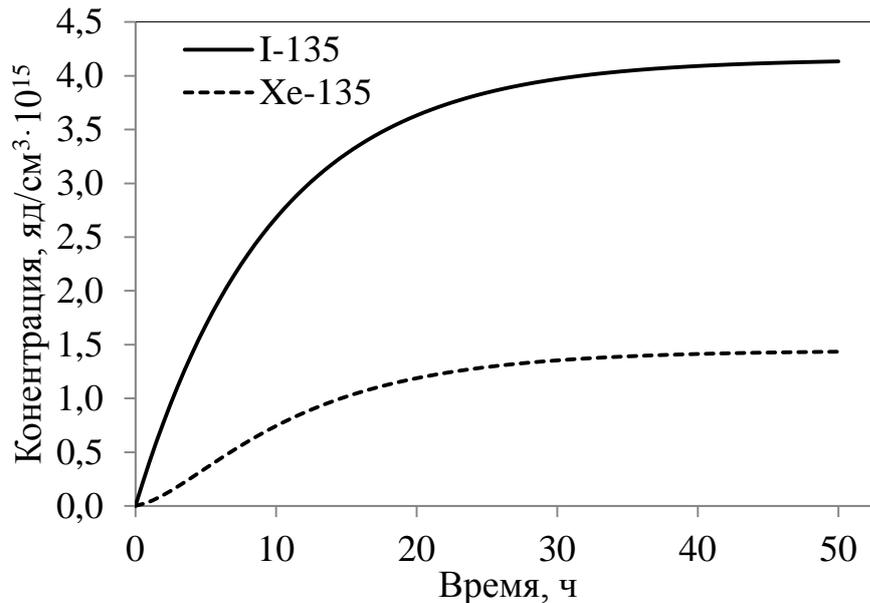


Рисунок 2.11.1.1.1 – Процесс изменения концентрации I-135 и Xe-135 при работе реактора на мощности

Для анализа расчётов было принято считать выходом концентрации в стационар момент, когда её значение превысит 95 % от значения стационарной концентрации. Из проведённых расчётов было определено время установления стационарных концентраций йода и ксенона – 30 и 33 часа соответственно.

Потери реактивности при отравлении Xe с момента пуска реактора и до установления стационарного значения описывается выражением [8]:

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_0^{Xe} \cdot \left(\frac{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi - \lambda_I} \cdot \left(e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi)t} - e^{-\lambda_I t} \right) - \left(e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi)t} - 1 \right) \right), \quad (2.11.1.1.5)$$

где ρ_0^{Xe} – стационарное значение потери реактивности за счёт Xe, которое определяется выражением:

$$\rho_0^{Xe} = -\theta \cdot (\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \frac{\sigma_{Xe}}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi} \cdot \frac{\sum_f^{\text{топл}}}{\sum_a^{\text{топл}}} \cdot \Phi. \quad (2.11.1.1.6)$$

С учётом значений из таблицы 2.11.1 и найденного значения Φ стационарное значение составило:

$$\rho_0^{Xe} = -0,819 \cdot (0,056 + 0,003) \cdot \frac{2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 2,39 \cdot 10^{13}}{2,11 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 2,39 \cdot 10^{13}} \cdot \frac{0,089}{0,115} = -0,0283.$$

На рисунке 2.11.1.1.2 представлен график потерь реактивности во времени.

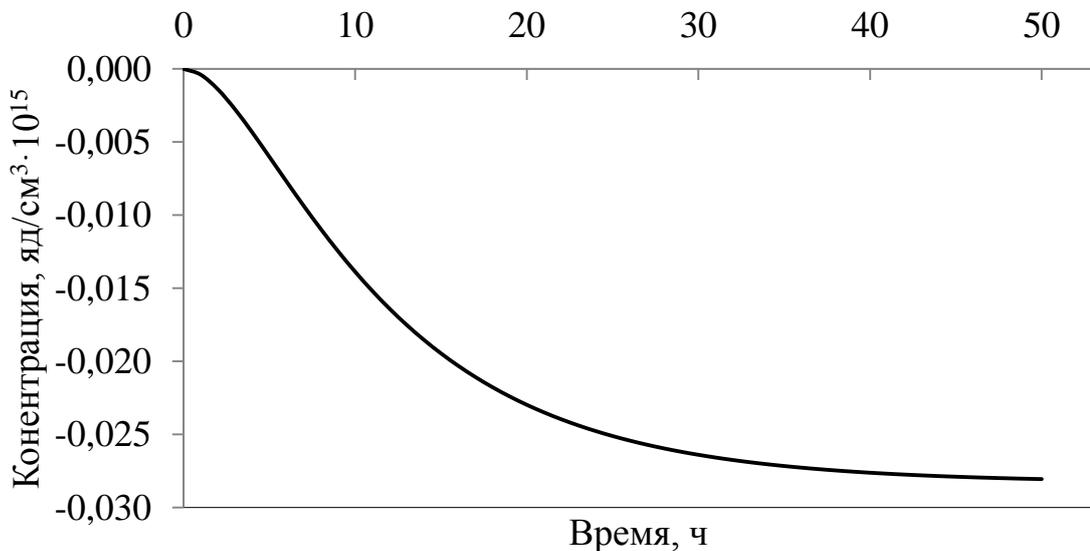


Рисунок 2.11.1.1.2 – Потери реактивности при стационарном отравлении реактора Xe-135

2.11.1.2 Нестационарное отравление Xe

После останова вследствие изменения мощности реактора происходит нарушение динамического равновесия между ростом и убылью ксенона: из-за распада йода и снижения выгорания ксенона концентрация последнего временно повышается.

После останова реактора концентрации йода и ксенона в любой момент времени после останова определяются выражениями [8]:

$$N_I(t) = N_0^I \cdot e^{-\lambda_I \cdot t}. \quad (2.11.1.2.1)$$

$$N_{Xe}(t) = N_0^{Xe} \cdot e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} + \frac{N_0^I}{1 - \frac{\lambda_{Xe}}{\lambda_I}} \cdot (e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} - e^{-\lambda_I \cdot t}). \quad (2.11.1.2.2)$$

Согласно формулам (2.11.1.2.1) и (2.11.1.2.2) был проведён расчёт концентраций йода и ксенона в различные моменты времени. По результатам расчёта были построены графики изменения концентраций, представленные на рисунке 2.11.1.2.1.

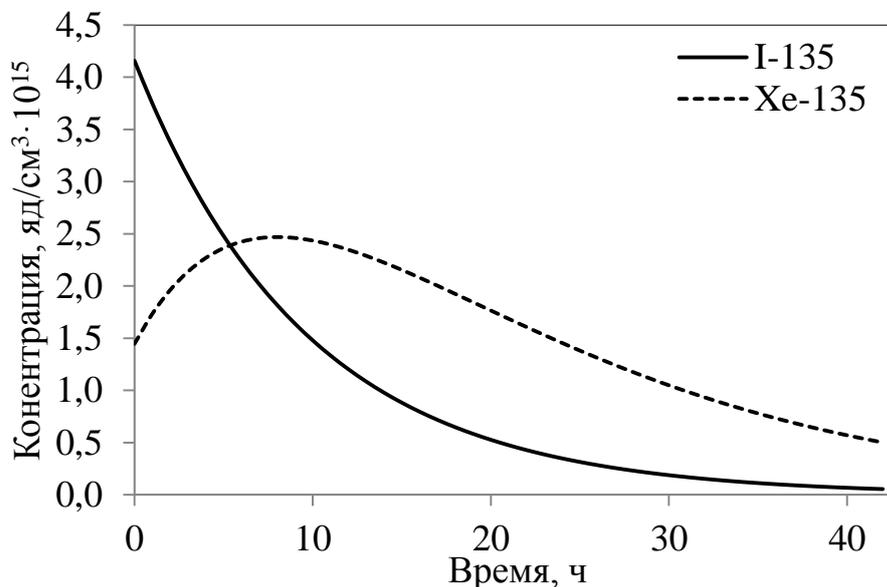


Рисунок 1.2.1 – Процесс изменения концентрации I-135 и Xe-135 после останова реактора

Зависимость потерь реактивности за счёт Xe во времени после останова реактора имеет следующий вид:

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_0^{Xe} \cdot \left(\frac{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} - \lambda_I} \cdot (e^{-\lambda_I t} - e^{-\lambda_{Xe} t}) + e^{-\lambda_{Xe} t} \right). \quad (2.11.1.2.3)$$

Согласно формуле (3.1.2.3) был проведён расчёт потери реактивности в различные моменты времени. Полученная в результате расчёта зависимость представлена на рисунке 2.11.1.2.2.

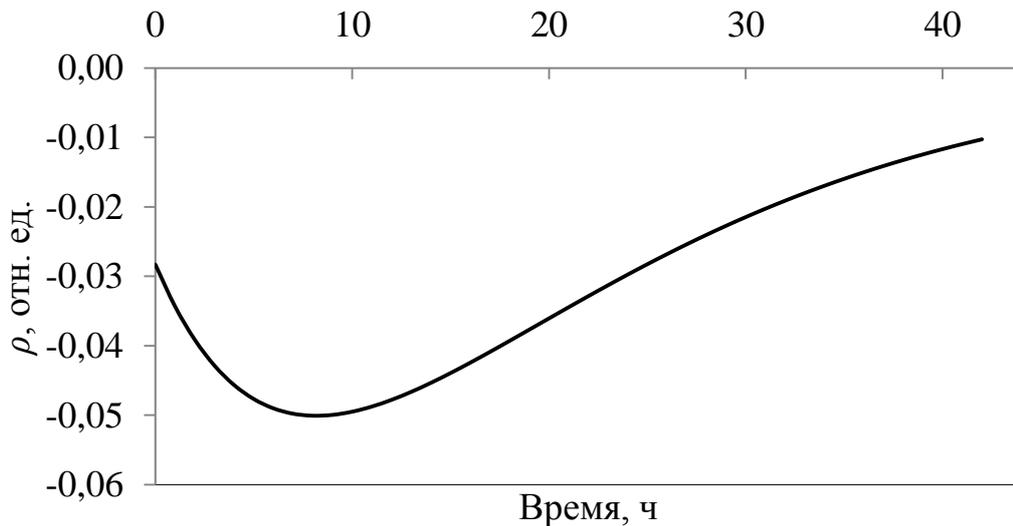


Рисунок 2.11.1.2.2 – Потери реактивности при нестационарном отравлении реактора Xe-135

Эффект нестационарного переотравления реактора ксеноном сверх его отравления на момент останова называется «йодной ямой».

Время достижения максимальной глубины «йодной ямы» определяется выражением:

$$t_{\max}^{\text{йя}} = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_I \cdot \lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} \cdot \lambda_I + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi} \right). \quad (2.11.1.2.4)$$

С учётом известных значений констант и найденного ранее значение Φ это время составило:

$$t_{\max}^{\text{йя}} = \frac{\ln \left(\frac{2,87 \cdot 10^{-5} \cdot 2,11 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 2,39 \cdot 10^{13}}{2,11 \cdot 10^{-5} \cdot 2,87 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 2,39 \cdot 10^{13}} \right)}{2,87 \cdot 10^{-5} - 2,11 \cdot 10^{-5}} = 29451,79 \text{ с} \approx 8,18 \text{ ч.}$$

2.11.2.1 Стационарное отравление самарием

Стационарные концентрации P_m и S_m определяется выражениями:

$$N_{cm}^{Pm} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_{Pm}} \quad (2.11.2.1.1)$$

$$N_{cm}^{Sm} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f}{\sigma_a^{Sm}} \quad (2.11.2.1.2)$$

С учётом известных значений были получены следующие значения для стационарных концентраций [8]:

$$N_{cm}^{Pm} = \frac{0,013 \cdot 0,089 \cdot 2,39 \cdot 10^{13}}{3,85 \cdot 10^{-6}} = 7,19 \cdot 10^{15}.$$

$$N_{cm}^{Sm} = \frac{0,013 \cdot 0,089}{5,92 \cdot 10^{-20}} = 1,95 \cdot 10^{16}.$$

В ходе работы реактора на стационарной мощности концентрации Pm и Sm изменяются во времени по следующим законам:

$$N_{Pm}(t) = N_{cm}^{Pm} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}) \quad (2.11.2.1.3)$$

$$N_{Sm}(t) = N_{cm}^{Sm} \cdot (1 - e^{-\sigma_{Sm} \cdot \Phi \cdot t}) - \frac{N_{cm}^{Pm}}{\frac{\sigma_{Sm} \cdot \Phi}{\lambda_{Pm}} - 1} \cdot (e^{-\lambda_{Pm} \cdot t} - e^{-\sigma_{Sm} \cdot \Phi \cdot t}) \quad (2.11.2.1.4)$$

Согласно формулам (2.11.2.1.3) и (2.11.2.1.4) был проведён расчёт концентраций Pm-149 и Sm-149 в различные моменты времени. По результатам расчёта были построены графики изменения концентраций, представленные на рисунке 2.11.2.1.1.

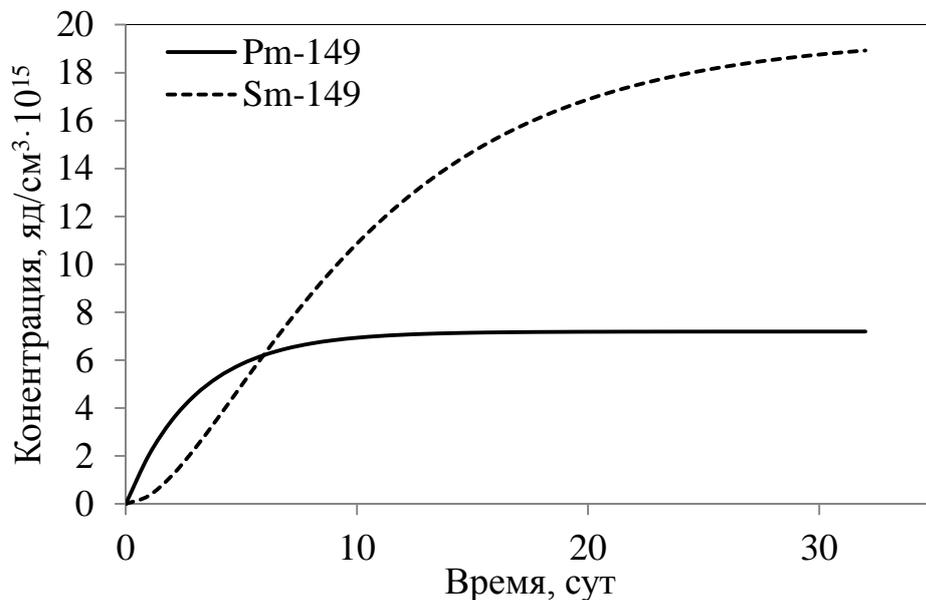


Рисунок 2.11.2.1.1 – Процесс изменения концентрации Pm-149 и Sm-149 при работе реактора на мощности

Согласно проведённым расчётам и полученным зависимостям стационарное значение концентрации Pm-149 и Sm-149 достигается через 10 и 29 суток соответственно.

Потери реактивности при отравлении Sm в любой момент времени до установления стационарного значения определяется выражением [8]:

$$\rho_{Sm}(t) = \rho_0^{Sm} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{Pm} \cdot e^{-\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot t}}{\lambda_{Pm} - \sigma_a^{Sm} \cdot \Phi} + \frac{\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}}{\lambda_{Pm} - \sigma_a^{Sm} \cdot \Phi} \right) \quad (2.11.2.1.5)$$

где ρ_0^{Sm} – стационарное значение потери реактивности при отравлении Sm, которое определяется выражением:

$$\rho_0^{Sm} = -\theta \cdot \omega_{Pm} \cdot \frac{\sum_f^{топл}}{\sum_a^{топл}} \quad (2.11.2.1.6)$$

С учётом известных значение стационарное значение потерь реактивности составило:

$$\rho_0^{Sm} = -0,819 \cdot 0,013 \cdot \frac{0,089}{0,115} = -0,00823.$$

Согласно формуле (2.11.2.1.5) были рассчитаны значения потерь реактивности в различные моменты времени. Полученная зависимость представлена на рисунке 2.11.2.1.2.

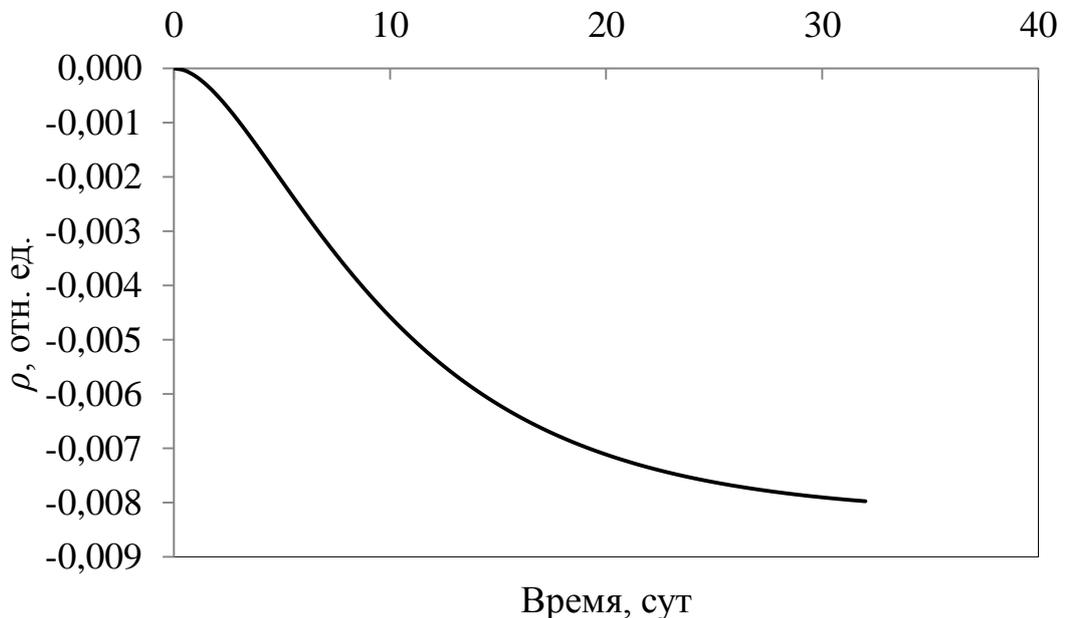


Рисунок 2.11.2.1.2 – Потери реактивности при стационарном отравлении реактора Sm-149

2.11.2.2 Нестационарное отравление Sm

Концентрации Pm и Sm после останова реактора в любой момент времени определяются выражениями [8]:

$$N_{Pm}(t) = N_{cm}^{Pm} \cdot e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}. \quad (2.11.2.2.1)$$

$$N_{Sm}(t) = N_0^{Sm} + N_0^{Pm} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}). \quad (2.11.2.2.2)$$

Согласно формулам (2.11.2.2.1) и (2.11.2.2.2) был проведён расчёт концентраций Pm и Sm в различные моменты времени. По результатам расчёта были построены графики изменения концентраций, представленные на рисунке 2.11.2.2.1.

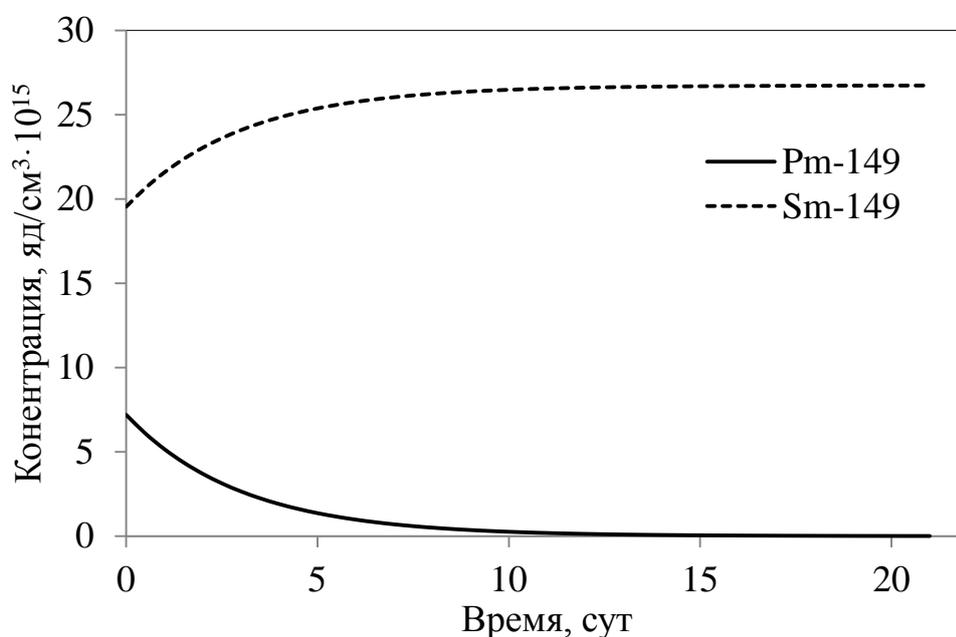


Рисунок 2.11.2.2.1 – Процесс изменения концентраций Pm-149 и Sm-149 после останова реактора

После останова концентрация Pm начинает уменьшаться из-за его распада и прекращения его наработки. Так же прекращается убыль Sm и его концентрация увеличивается за счёт распада Pm.

Потери реактивности при накоплении Sm в любой момент времени после останова реактора определяются выражением [8]:

$$\rho_{п.п.}(t) = \rho_{п.п.} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}), \quad (2.11.2.2.3)$$

где $\rho_{п.п.}$ – глубина «прометиевого провала», которая рассчитывается по формуле:

$$\rho_{п.п.} = \rho_0^{Sm} \cdot \frac{\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi}{\lambda_{Pm}}. \quad (2.11.2.2.4)$$

С учётом известных значений было получено значение глубины «прометиевого провала»:

$$\rho_{п.п.} = -0,00823 \cdot \frac{5,92 \cdot 10^{-20} \cdot 2,39 \cdot 10^{13}}{3,85 \cdot 10^{-6}} = -0,00303.$$

Согласно формуле (2.11.2.2.3) был проведён расчёт потери реактивности в различные моменты времени. Полученная в результате расчёта зависимость представлена на рисунке 2.11.2.2.2.

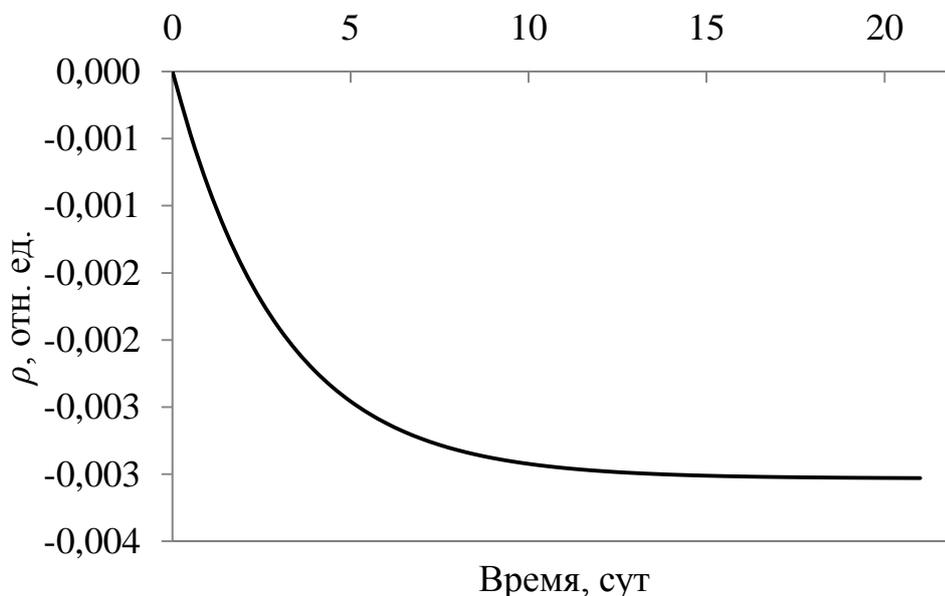


Рисунок 2.11.2.2.2 – Потери реактивности при нестационарном отравлении реактора Sm-149

2.12 Расчёт в программе WIMS-D5B

2.12.1 Расчёт «холодного» реактора

Для проведения расчёта в программе WIMS-5DB была создана расчетная модель: бесконечная по высоте элементарная ячейка реактора, состоящая из твэл и окружающего его слоя воды [13]. Для создания расчётной модели реальная элементарная ячейка реактора ВВЭР была заменена эквивалентной ей цилиндрической элементарной ячейкой, имеющей ту же

площадь поперечного сечения, что и реальная ячейка [14]. На рисунке 2.12.1 представлена схема расчётной модели.

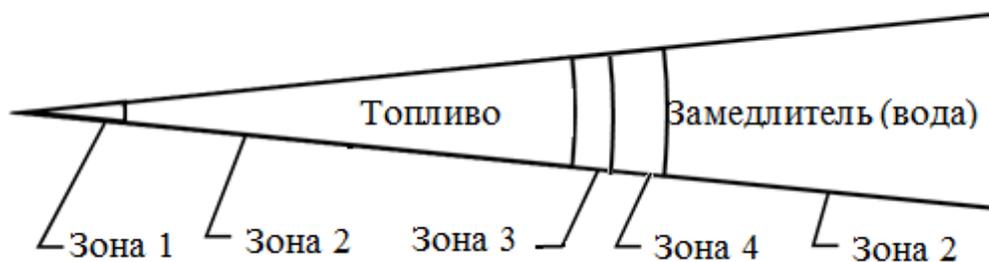


Рисунок 2.12.1.1 – Расчётная модель для программы WIMS-5DB

Для расчёта холодного реактора температура всех материалов задавалась равной 293 К. Для расчёта эффективного коэффициента размножения использовалось определённое ранее значение геометрического параметра B^2 [15].

В результате расчёта в программе WIMS-5DB «холодного» реактора были получены следующие значения: $k_{\infty} = 1,261$ и $k_{эфф} = 1,244$.

2.12.2 Расчёт «горячего» реактора

Для расчёта «горячего» реактора температура топлива задавалась равной 1300 К, температура оболочки – 700 К, температура замедлителя – 543 К. В результате расчёта были получены следующие значения: $k_{\infty} = 1,226$ и $k_{эфф} = 1,210$.

С помощью программы WIMS-5DB были определены значения эффективного коэффициента размножения нейтронов и запаса реактивности реактора. Результаты представлены в таблице 2.12.2.1 на рисунке 2.12.2.1.

Таблица 2.12.2.1 – Изменение запаса реактивности в ходе работы реактора

Время работы, сут	Значение $k_{эфф}$	Запас реактивности, %
0	1,21	17,355
2	1,172	14,676
20	1,159	13,719

Продолжение таблицы 2.12.2.1

100	1,127	11,269
200	1,085	7,834
300	1,046	4,398
400	1,01	0,99

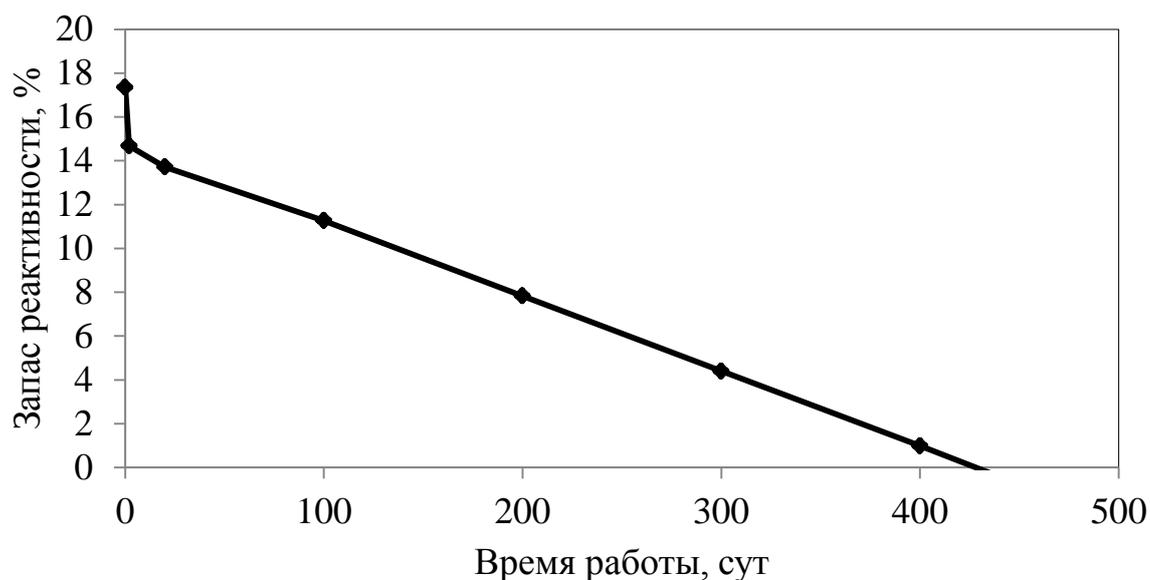


Рисунок 2.12.2.1 – Изменение запаса реактивности в ходе работы реактора

В результате расчёта было получено значение длины кампании реактора, которая составила 400 суток. Из полученной зависимости также было оценено значение стационарного отравления реактора ксеноном – 2,7 %.

2.12.3 Изменение нуклидного состава

Для каждого расчётного шага кампании были определены концентрации изотопов U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} и Pu^{241} . Полученные зависимости представлены на рисунках 2.12.3.1 и 2.12.3.2.

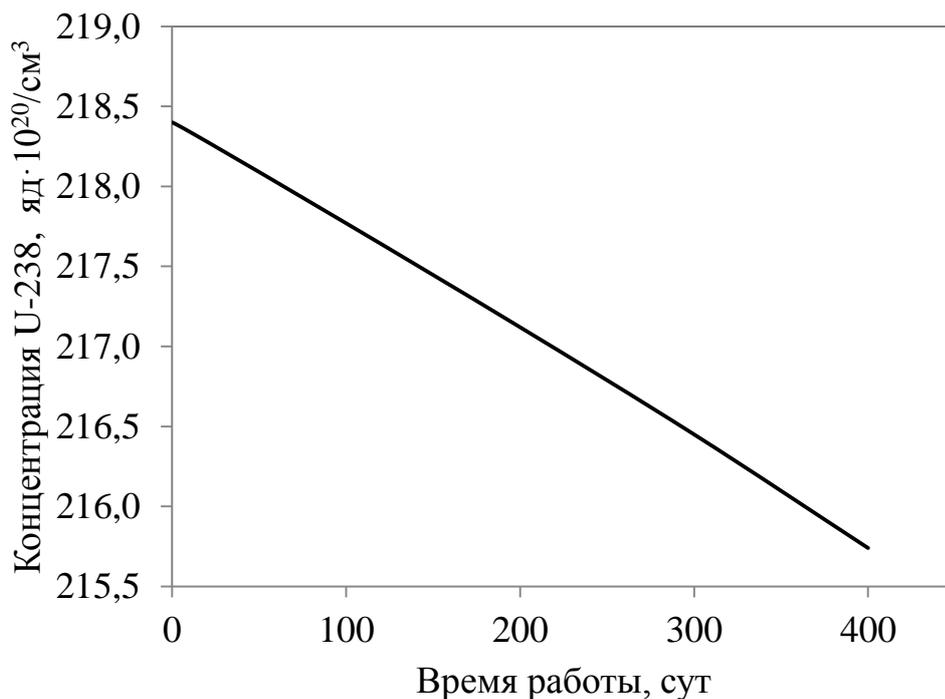


Рисунок 2.12.3.1 Изменение концентрации U^{238} в течение кампании реактора

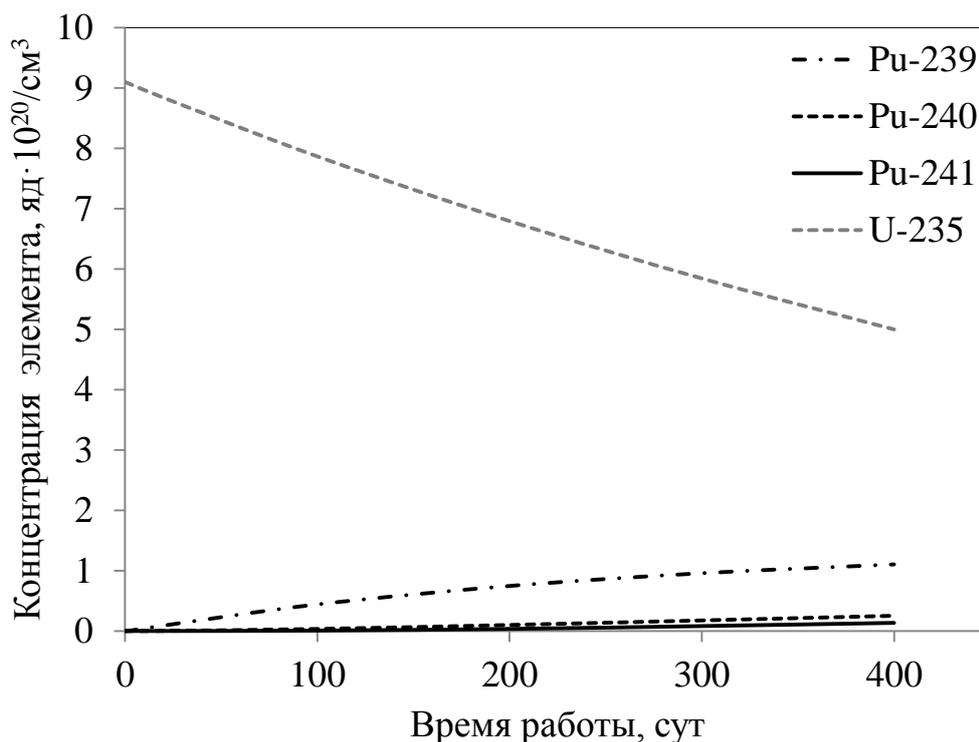


Рисунок 2.12.3.2 – Изменение концентрации U^{235} , Pu^{239} , Pu^{240} и Pu^{241} в течение кампании реактора

Результаты расчёта показали, что ядерная концентрация U^{238} изменялась в течение кампании по линейному закону, а ядерные концентрации U^{235} , Pu^{239} ,

Pu^{240} и Pu^{241} по нелинейному. Ядерная концентрация U^{235} уменьшается к концу кампании более чем на 40 %.

Для оценки значения коэффициента воспроизводства была рассчитана зависимость изменения (воспроизводства) ядерной концентраций Pu^{239} на каждом шаге от изменения (выгорания) ядерной концентрации U^{235} . Полученная зависимость представлена на рисунке 2.12.3.3.

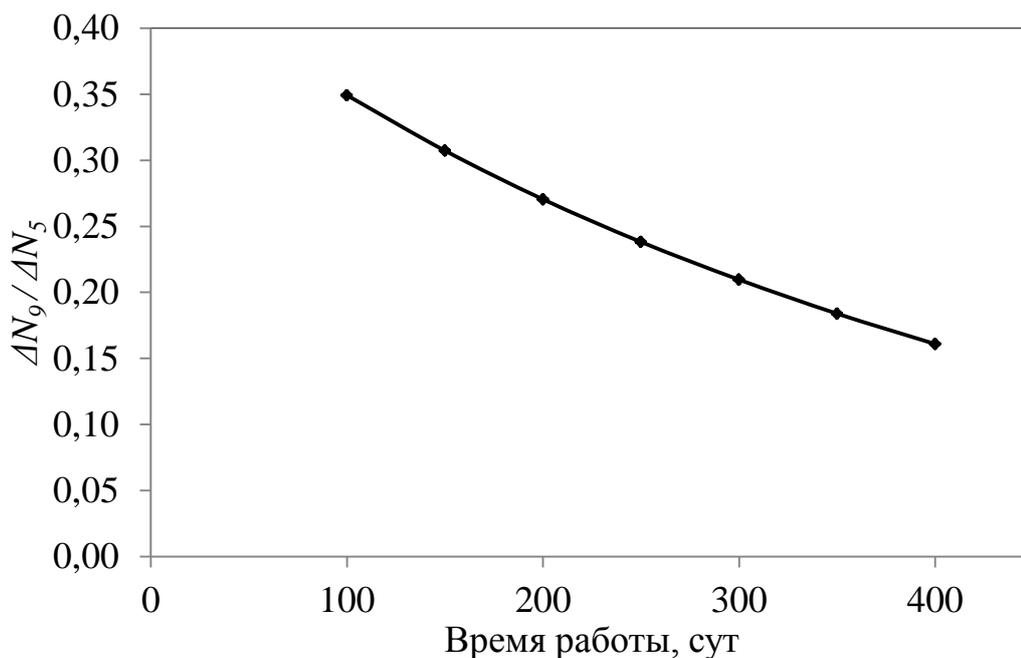


Рисунок 2.12.3.3 – Отношение изменения ядерной концентраций Pu^{239} на каждом шаге от изменения ядерной концентрации U^{235}

Полученная зависимость не учитывает деление Pu^{239} . В начале кампании численные оценки воспроизводства горючего можно с достаточной степенью точности считать оценками КВ. Оценочное значение КВ составило 0,35.

2.12.4 Вклад в энерговыделение различных нуклидов

Для расчёта вклада в энерговыделение было принято, что при делении всех изотопов урана и плутония как быстрыми, так и тепловыми нейтронами выделяется одинаковое количество энергии: 200 МэВ. На рисунках 2.12.4.1 изображены графики, описывающие вклады в энерговыделение изотопов урана и плутония.

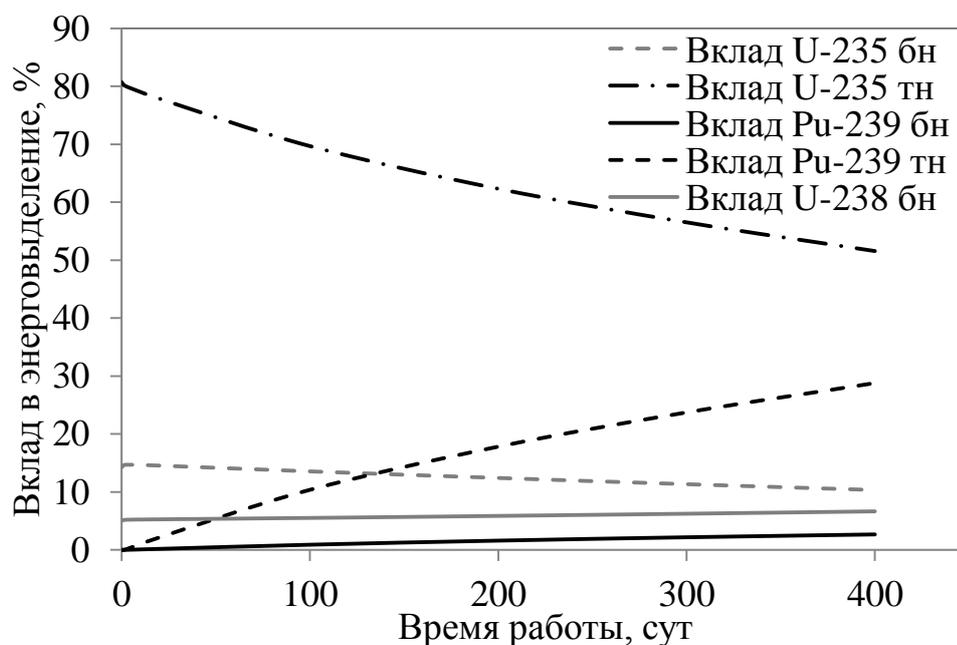


Рисунок 2.12.4.1 – Вклад в энерговыделение различных нуклидов

Анализ результатов расчёта показал, что наибольший вклад в энерговыделение происходил за счёт деления U^{235} тепловыми нейтронами. Вклад за счёт деления U^{235} тепловыми нейтронами уменьшался с 80 % в начале кампании до 51,6 % в конце кампании. Вклад за счёт деления Pu^{239} тепловыми нейтронами рос в ходе кампании с нулевого значения в начале кампании до 28,8 % в конце кампании. Вклад за счёт деления U^{235} быстрыми нейтронами уменьшался в течении кампании с 14,3 % до 10,3 %. Вклад быстрыми нейтронами Pu^{239} не превышал 3 %, а U^{238} – 6 %. Вклады в энерговыделение тепловых и быстрых нейтронов представлены на рисунке 2.12.4.2.

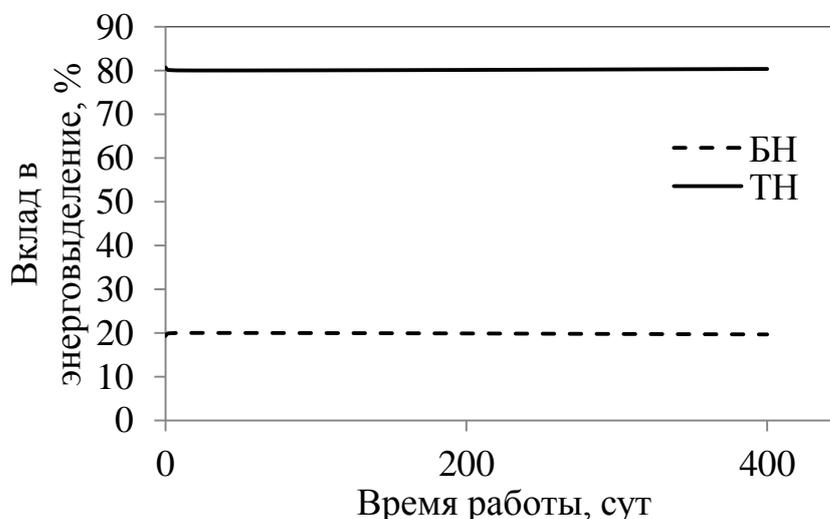


Рисунок 2.12.4.2 – Вклад в энерговыделение тепловых и быстрых нейтронов

По результатам расчёта вклад в энерговыделение за счёт делений тепловыми нейтронами составил 80%, а за счёт делений быстрыми – 20 %.

2.13 Сравнение результатов расчёта

Сравнение результатов расчёта одnogрупповым методом и с помощью программы WIMS-D5B представлено в таблице 2.13.1. Погрешности расчёта рассчитывались относительно значений, полученных в программе WIMS-D5B, так как одnogрупповой метод является менее точным.

Таблица 2.13.1 Сравнение результатов расчёта коэффициента размножения в бесконечной среде

Состояние реактора	Одnogрупповой метод	Расчёт в WIMS-D5B	Отклонение одnogруппового расчёта относительно расчёта в WIMS-D5B, %
«Холодный» реактор	1,248	1,261	1,031
«Горячий» реактор	1,212	1,226	1,142

Сравнение результатов расчёта показало, что значения расчёта коэффициента размножения в бесконечной среде отличается для «горячего» и «холодного» реактора приблизительно на 1 %. Такое небольшое отличие позволяет сделать вывод: расчёты одnogрупповым методом и в программе WIMS-D5B сходятся.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Выполнение грамотной научно-исследовательской работы требует наличия экономической оценки всех её элементов: как объекта исследования, так и методов, которые для этого используются. Цель данного раздела ВКР заключается в оценке конкурентоспособности и ресурсоэффективности научной разработки ядерного реактора типа ВВЭР с тепловой мощностью 1500 МВт и изменением температуры теплоносителя в активной зоне от 260°С до 280 °С. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- произвести анализ конкурентных технических решений;
- произвести SWOT-анализ рассматриваемой установки;
- определить показатели ресурсоэффективности установки;
- выявить структуру работ и их исполнителей;
- определить трудоемкость проводимых работ;
- разработать график проведения исследования;
- рассчитать размер бюджета исследования;

3.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

Данный пункт представляет собой полный перечень проводимых работ, где определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным достаточно объективным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей не превышает двух, предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные сведения о выполнении данной работы представлены в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 20% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 50%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 30% И – 100%
Выбор исходных параметров	НР, И	НР – 100% И – 60%
Методика расчета	НР, И	НР – 100% И – 80%
Нейтронно-физический расчет ЯР	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 100% И – 80%

Как видно из представленной выше таблицы, роль научного руководителя в ходе выполнения всех видов работ сводится к направляющей и контролирующей функциям, когда как инженер является исполнительным звеном – он выполняет все поставленные задачи для достижения установленной цели.

3.1.1 Продолжительность этапов работ

Продолжительность этапов работ могут быть рассчитаны следующими двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Первый метод подразумевает наличие и использование соответствующей нормативной базы трудоёмкости всех применяемых в работе процессов, так как они по своей природе являются повторяющимися с достаточно высокой частотой при условии стандартной, устойчивой обстановки. В связи с тем, что подобными нормативами исполнитель не обладает в виду нестандартности и неравномерности распределения рабочих

усилий применяется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Способ с применением достаточно актуальных, как с точки зрения времени, так и со стороны реальной применимости аналогов к разрабатываемой НИР имеет ряд преимуществ: он относительно прост в исполнении и не сопряжён с большим количеством затрат. Однако на практике он может быть слишком локальным и применяться только для отдельных элементов – невозможно найти абсолютно идентичных работ.

Второй способ – экспертный – применим в ситуации, когда аналоги выполняемой НИР отсутствуют. Он предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию.

Для определения вероятных значений продолжительности работ $t_{ОЖ}$ может применяться одна из двух формул [16].

$$t_{ОЖ} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5} \quad (3.1.1)$$

$$t_{ОЖ} = \frac{t_{\min} + 4t_{\text{prob}} + t_{\max}}{6} \quad (3.1.2)$$

где t_{\min} – минимальная продолжительность работы, сут.;

t_{\max} – максимальная продолжительность работы, сут.;

t_{prob} – наиболее вероятная продолжительность работы, сут.

Как видно из самой конструкции формул, вторая требует большего анализа каждого из элементов работы и вероятностной оценки их продолжительности, что, очевидно, усложняет все

Для выполнения перечисленных в таблице 3.1 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель ВКР;

– научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни.

Расчёт продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях [16]:

$$T_{\text{рД}} = \frac{t_{\text{ОЖ}}}{K_{\text{ВН}}} \cdot K_{\text{Д}} \quad (3.1.3)$$

где $K_{\text{ВН}}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей;

$K_{\text{Д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ.

Расчёт продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} \quad (3.1.4)$$

где $T_{\text{КАЛ}}$ – календарные дни;

$T_{\text{ВД}}$ – выходные дни;

$T_{\text{ПД}}$ – праздничные дни.

При учёте, что $T_{\text{КАЛ}} = 365$, $T_{\text{ВД}} = 52$, $T_{\text{ПД}} = 10$.

В приложении Г приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоёмкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле 3.1. Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоёмкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента $K_{\text{Д}} = 1,2$. Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{\text{ож}} \cdot K_{\text{Д}}$. Столбцы 8 и 9 – трудоёмкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на $T_{\text{К}} = 1,204$. Итог по столбцу 5 даёт общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоёмкости для каждого из участников проекта. Величины трудоёмкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9

кроме итогов, позволяют построить диаграмму Гантта, представленную в приложении Д.

3.2 Потенциальные потребители результатов исследования

Современные мировые тенденции определяют вектор развития любой технологической, научной и прочих отраслей. Особенно сильно поднимается вопрос о необходимости планирования и организации всех проводимых работ, а именно – с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Таким образом, существует потребность в определении затрат на проведение научно-исследовательских работ и их продолжительности, что, в свою очередь, определяет экономическую эффективность и конкурентоспособность рассматриваемого в данной научно-исследовательской работе реактора типа ВВЭР-1000.

Потенциальные рынки для данного типа реактора:

- традиционная конкуренция со тепловыми электростанциями;
- замена выходящих из эксплуатации ядерных реакторов, в том числе другого типа (строящаяся Курская АЭС-2 будет иметь энергоблоки с реакторами типа ВВЭР взамен выходящих из эксплуатации энергоблоков с реакторами типа РБМК действующей Курской АЭС) [17];
- страны, заинтересованные в использовании атомной энергии, могут начать свои проекты с подтвердившими свою надёжность и эффективность реакторами типа ВВЭР.

Рынок услуг по использованию ЯЭУ можно сегментировать по множеству критериев. В таблице 3.2.1 представлена карта сегментирования рынка ЯЭУ в России. В России основными энергетическими типами реакторов являются: реакторы типа ВВЭР и РБМК. Кроме того в России эксплуатируются два энергетических реактора, работающих на быстрых нейтронах. Таким образом рынок был сегментирован по типу эксплуатируемых ЯЭУ: реакторы типа БН, РБМК и ВВЭР.

Таблица 3.2.1 – Карта сегментирования рынка ЯЭУ

		Тип ЯЭУ		
		Реакторы типа БН	Реакторы типа РБМК	Реакторы типа ВВЭР
Количество эксплуатирующихся ЯЭУ	11-25			
	3-10			
	1-2			

На основе карты сегментирования рынка можно сделать вывод о том, что в России наиболее используемыми реакторами являются реакторы типа ВВЭР.

3.3 Анализ конкурентных технических решений и ресурсоэффективности

Для проведения анализа конкурентоспособности используется оценочная карта, приведенная в таблице 3.2.1. В качестве конкурентов реактора ВВЭР-1000 были выбраны реакторы РБМК-1000 и БН-800. Каждый реактор оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле [16]:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (3.3.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Для каждого реактора было рассчитано значение K по формуле (3.3.1.). В таблице 3.3.1 представлена оценочная карта конкурентоспособности различных характеристик, упомянутых реакторов.

Таблица 3.3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентноспособность		
		Б _В	Б _Р	Б _Б	К _В	К _Р	К _Б
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство в эксплуатации	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
2. Энергоэкономичность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
3. Надежность	0,18	5	4	4	0,9	0,72	0,72
4. Размеры ЯЭУ	0,01	5	4	4	0,05	0,04	0,04
5. Безопасность	0,25	5	4	5	1,25	1	1,25
6. Расход воды	0,04	4	4	5	0,16	0,16	0,2
7. Обогащение топлива	0,04	4	5	3	0,16	0,2	0,12
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	5	3	3	0,2	0,12	0,12
2. Стоимость теплоносителя	0,04	5	5	3	0,2	0,2	0,12
3. Уровень проникновения на рынок	0,01	5	3	1	0,05	0,03	0,01
4. Обслуживание после введения объекта в эксплуатацию	0,03	5	4	4	0,15	0,12	0,12
5. Предполагаемый срок эксплуатации	0,12	5	3	4	0,6	0,36	0,48
6. Длительность топливного цикла	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
Итого	1	62	50	47	4,82	3,81	4,1

Представленные показатели позволяют произвести расчёт интегральных показателей ресурсоэффективности и эффективности разработки. Для этого воспользуемся следующими формулами [16]:

$$I_{\text{рес.эф.}} = \sum_{i=1} \frac{K_j^i}{0,7}, \quad (3.3.2)$$

$$\Theta = \sum_{i=1} \frac{K_j^i}{0,3}, \quad (3.3.3)$$

где $I_{\text{рес.эф.}}$ – интегральный показатель ресурсоэффективности;

i – определённый фактор;

j – конкретный тип реактора;

Э – эффективность разработки.

С учётом известных значений K_j^i , были получены следующие значения:

$$I_{рес.эф.}^B = 4,60, I_{рес.эф.}^P = 3,83, I_{рес.эф.}^B = 3,93, Э^B = 5,33, Э^P = 3,77, Э^B = 4,50.$$

Анализ оценочной карты сравнения конкурентных технических решений позволяет сделать вывод о том, что реакторы типа ВВЭР-1000 являются самыми оптимальными ядерными реакторами для производства электроэнергии и в большинстве оцененных параметров превосходит своих конкурентов. ВВЭР-1000 также обладает наиболее высокими показателями эффективности и интегральной ресурсоэффективности. Полученные выводы подтверждаются и картой сегментирования рынка: ЯЭУ типа ВВЭР-1000 наиболее распространены на рынке атомной энергетики.

3.4 SWOT-анализ

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

Сильными сторонами могут являться факторы, которые отражают наиболее конкурентоспособную сторону рассматриваемой ЯЭУ.

Сильными сторонами данной ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности установки:

- использование корпусной схемы и активных и пассивных систем безопасности увеличивает безопасность установки [12];
- доступность и низкая стоимость теплоносителя и замедлителя – воды, а также отработанные технологии по ее получению;
- наличие высокой замедляющей способности позволяет достичь высокого энерговыделения с единицы объема [12].

Слабыми сторонами считаются те особенности рассматриваемого объекта, которые могут препятствовать его наиболее выгодному и беспрепятственному использованию.

Слабыми сторонами рассматриваемой ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности:

- относительно высокое поглощение нейтронов водой требует использования только обогащенного топлива, что приводит к увеличению его стоимости;
- высокое давление при энергетически приемлемых температурах;
- коррозионная активность воды с конструкционными материалами, что приводит к использованию двуокиси урана и нержавеющей стали, это ухудшает баланс нейтронов и увеличивает затраты на эксплуатацию.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта.

К возможностям реакторной установки можно отнести:

- снижение стоимости электроэнергии;
- предоставление дополнительных рабочих мест;
- расширение производства и мощностей для обеспечения работоспособности ЯЭУ.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды объекта, что может иметь разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

К угрозам по отношению к рассматриваемому реактору можно отнести:

- природные катаклизмы;
- снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок;
- диверсионные и террористические действия.

В таблице 3.4.1 представлен SWOT-анализ в виде таблицы.

Таблица 3.4.1 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С 1. Использование корпусной схемы и активных и пассивных систем безопасности увеличивает безопасность установки;</p> <p>С 2. Доступность и низкая стоимость теплоносителя и замедлителя – воды, а также отработанные технологии по ее получению;</p> <p>С 3. Наличие высокой замедляющей способности позволяет достичь высокого энерговыделения с единицы объема.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл 1. Относительно высокое поглощение нейтронов водой требует использования только обогащенного топлива, что приводит к увеличению его стоимости;</p> <p>Сл 2. Высокое давление при энергетически приемлемых температурах;</p> <p>Сл 3. Коррозионная активность воды с конструкционными материалами, что приводит к использованию двуоксида урана и нержавеющей стали, это ухудшает баланс нейтронов и увеличивает затраты на эксплуатацию.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В 1. Для условий России вода является более дешевым материалом в качестве теплоносителя;</p> <p>В 2. Предоставление дополнительных рабочих мест;</p> <p>В 3. Расширение производства и мощностей для обеспечения работоспособности ЯЭУ.</p>	<p>1. Удачное совмещение конструкционных материалов в установке обеспечивает надежную эксплуатацию и высокие показатели выработки электроэнергии.</p> <p>2. Системы безопасности установки отвечают всем требованиям, которые предъявляются к современным АЭС,</p> <p>3. Увеличение привлекательности данной энергетической установки среди потенциальных стран заказчиков данного проекта.</p>	<p>1. Необходимость иметь высокое давление в реакторе усложняет конструкцию корпуса реактора и его отдельных узлов;</p> <p>2. Большое сечение поглощения нейтронов водой требует увеличения обогащения ядерного топлива, что может увеличить стоимость электроэнергии;</p> <p>3. Коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы;</p> <p>4. Радиолит воды и коррозионная активность могут вызвать некоторые трудности при переходе на одноконтурную схему.</p>

Продолжение таблицы 3.4.1

<p>Угрозы: У1. Природные катаклизмы. У2. Снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок. У3. Диверсионные и террористические действия.</p>	<p>1. Предназначена для выработки электрической энергии на площадках с широким диапазоном природно-климатических условий. 2. Обеспечивается безопасность во всех типах аварий.</p>	<p>1. Наличие высокого давления делает ЯЭУ уязвимой перед природными катаклизмами. 2. Несмотря на высокий уровень защищенности реактора высок риск утечки теплоносителя при техногенной или природной катастрофе. 3. Наличие ядерных материалов ведёт к привлечению действий террористического и диверсионного характеров.</p>
--	---	--

Проведённый SWOT-анализ позволяет с достаточной для данной работы точностью определять дальнейшее положение рассматриваемого объекта на соответствующем рынке. Реакторная установка ВВЭР-1000 в связи с отличными характеристиками имеет достаточно устойчивые перспективы для использования в качестве источника электроэнергии.

3.5 Расчёт накопления готовности проекта

Текущее состояние работы над проектом нуждается в оценке для точного понимания всех затраченных усилий. Получаемые по итогу подобной оценки величины (величины накопления готовности работы) отображают количество процентов, на которое выполнен весь объём работ по проекту в целом по окончании текущего (i -го) этапа [16].

Введём некоторые обозначения:

- $TR_{\text{общ}}$ – общая трудоёмкость проекта;
- TR_i (TR_k) – трудоёмкость i -го (k -го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;
- TR_i^H – накопленная трудоёмкость i -го этапа проекта по его завершении;

– TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоёмкость работ, выполняемых j -м участником на i -м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, в нашем примере $m = 2$.

Степень готовности определяется формулой (3.5) [16]:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}} \quad (3.5.1)$$

Применительно к таблице, представленной в приложении Г, величины TP_{ij} (TP_{kj}) находятся в столбцах (6, $j = 1$) и (7, $j = 2$). Величина $TP_{\text{общ}}$ равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Пример расчета $TP_i(\%)$ и $CG_i(\%)$ на основе этих данных содержится в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	$TP_i, \%$	$CG_i, \%$
Постановка задачи	2,36	2,36
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	5,19	7,55
Подбор и изучение материалов по тематике	13,68	21,23
Разработка календарного плана	3,30	24,53
Обсуждение литературы	4,25	28,78
Выбор исходных параметров	6,60	35,38
Методика расчета	10,85	46,23
Нейтронно-физический расчет	23,11	69,34
Оформление расчетно-пояснительной записки	16,51	85,85
Оформление графического материала	10,85	96,70
Подведение итогов	3,30	100

Анализ проведённых расчётов показывает, что наибольшее количество трудозатрат приложено на этапах подбора и изучения материала по тематике, проработки методики расчёта и при его непосредственном осуществлении, когда как этапы, включающие подбор и оформление различного рода документов, подготовку необходимой базы для проведения практических изысканий по отдельности потребовали меньше времени и сил.

3.6 Расчёт сметы на выполнение проекта

Смета на выполнение данного исследования содержит все расходы, необходимые для осуществления комплекса работ, необходимых для реализации всего спектра поставленных перед проектом задач. Расчёт полной (сметной) стоимости выполнения исследования производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

3.6.1 Расчёт затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает, так называемые, транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (транзакции). Приблизённо они оцениваются в

процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в границах, представленных в таблице 3.6.1.1

Таблица 3.6.1.1 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	260	1 уп.	260
Картридж для принтера	1040	1 шт.	1040
Итого:			1300

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны:

$$C_{\text{МАТ}} = 1300 \cdot 1,05 = 1365 \text{ рублей.} \quad (3.6.1.1)$$

3.6.2 Расчёт заработной платы

Данная статья расходов подразумевает суммарную заработную плату научного руководителя и инженера (исполнителя), с учётом входящих в фонд заработной платы различных премий. Основная заработная плата рассчитывается, опираясь на трудоёмкость выполнения каждого этапа и на величину месячного оклада (МО) исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083} \quad (3.6.2.1)$$

где 25,083 – среднее количество рабочих дней в месяце при шестидневной рабочей неделе.

Пример расчёта затрат на полную заработную плату приведены в таблице 3.6.2.1 Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из приложения Г. Учёт всевозможных премий и районной надбавки осуществляется путём использования ряда коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{Доп.ЗП}} = 1,188$; $K_{\text{Р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к

соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{И} = K_{ИР} \cdot K_{доп.зп} \cdot K_{Р}; \quad (3.6.2.2)$$

$$K_{И} = 1,3 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 2,028.$$

Таблица 3.6.2.1 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{И}$	Фон з/п, руб.
ИР	35120	1400,15	22	2,028	62469,09
И	12130	483,59	53	2,028	51978,19
Итого:					114447,28

3.6.3 Расчёт затрат на страховые взносы

На затраты на страховые взносы, включающие в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование установлена ставка 30,2 %. С учётом такой ставки был произведён расчёт взносов:

$$C_{соц} = C_{зп} \cdot 0,302; \quad (3.6.3.1)$$

$$C_{соц} = 114447,28 \cdot 0,302 = 34563,08 \text{ рублей.}$$

Данные взносы идут в Фонд государственного социального страхования (ФСС), Пенсионный фонд (ПФ) и Фонд медицинского страхования (ФФОМС).

3.6.4 Расчёт затрат на электроэнергию

Данные расходы подразумевают затраты на то количество электроэнергии, которая потрачена для выполнения всего проекта, то есть на работу используемого оборудования. Они рассчитываются по формуле:

$$C_{эл.об} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot C_{э}, \quad (3.6.4.1)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{э}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{об}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $C_{э} = 5,748$ руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования рассчитывается на основе суммарной трудоёмкости работ из приложения Г для исполнителя ($T_{РД}$) при условии, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{ОБ} = T_{РД} \cdot K_t, \quad (3.6.4.2)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{РД}$, определяется самостоятельно.

В ряде случаев возможно определение $t_{ОБ}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{ОБ} = P_{НОМ} \cdot K_C, \quad (3.6.4.3)$$

где $P_{НОМ}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности $K_C = 1$.

Расчёт затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 3.6.4.1.

Таблица 3.6.4.1– Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{ОБ}$, час	Потребляемая мощность $P_{ОБ}$, кВт	Затраты $C_{ЭЛ.ОБ}$, руб.
Персональный компьютер	352	0,3	606,99
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			608,14

3.6.5 Расчёт амортизационных расходов

Данная статья подразумевает расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{АМ} = \frac{H_A \cdot t_{ОБ} \cdot C_{ОБ} \cdot n}{F_D}, \quad (3.6.5.1)$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

$t_{\text{ОБ}}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Например, для ПК в 2020 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне, $F_{\text{д}}$ равен:

$$F_{\text{д}} = 298 \cdot 8 = 2384.$$

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

$H_{\text{А}}$ определяется как величина обратная $C_{\text{А}}$, в данном случае это:

$$H_{\text{А}} = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{0,4 \cdot 352 \cdot 100000 \cdot 1}{2384} = 5906,04 \text{ рублей.}$$

3.6.6 Расчёт прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражаются расходы на выполнение проекта, которые не могут быть учтены в предыдущих статьях или же которые не могут быть предвидены. Их следует принимать равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (C_{\text{МАТ}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{СОЦ}} + C_{\text{ЭЛ.ОБ}} + C_{\text{АМ}}) \cdot 0,1. \quad (3.6.6.1)$$

Прочие расходы в нашем случае:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (1365 + 114447,28 + 34563,08 + 608,14 + 5906,04) \cdot 0,1 = 15688,95 \text{ рублей.}$$

3.6.7 Расчёт суммарной себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Нейтронно-физический расчёт реактора типа ВВЭР» (таблица 3.6.7.1).

Таблица 3.6.7.1 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма,	
		руб.	%
Материалы и покупные изделия	$C_{МАТ}$	1365,00	0,79
Основная заработная плата	$C_{ЗП}$	114447,28	66,32
Страховые взносы	$C_{СОЦ}$	34563,08	20,03
Расходы на электроэнергию	$C_{ЭЛ.ОБ}$	608,14	0,35
Амортизационные отчисления	$C_{АМ}$	5906,04	3,42
Прочие расходы	$C_{ПРОЧ}$	15688,95	9,09
Итого:		172578,50	100

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 172578,50$ руб. Проведение анализа вклада каждой из статей в суммарные затраты на работу выявило, что основной вклад вносят отчисления на заработную плату участников проекта, когда как расходы на материалы и обеспечение электроэнергией практически не повлияли на финальную величину.

3.6.8 Расчёт прибыли

Ввиду отсутствия данных, прибыль G рассчитана как 20% от полной себестоимости проекта:

$$G = C \cdot 0,2; \quad (3.6.8.1)$$

$$G = 172578,50 \cdot 0,2 = 34515,70 \text{ рублей.}$$

3.6.9 Расчёт НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2; \quad (3.6.9.1)$$

$$\text{НДС} = (172578,50 + 34515,70) \cdot 0,2 = 41418,84 \text{ рублей.}$$

3.6.10 Цена разработки проекта

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (3.6.10.1)$$

$$C_{\text{НИР}} = 172578,50 + 34515,70 + 41418,84 = 248513,04 \text{ рублей.}$$

4. Социальная ответственность

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 26000-2012 под социальной ответственностью понимается ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое [18]:

- содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- учитывает ожидания заинтересованных сторон;
- соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения;
- интегрировано в деятельность всей организации и применяется во всех ее взаимоотношениях.

Объектом исследования данного раздела является работа по проведению нейтронно-физического расчёта реактора типа ВВЭР.

Целью данного раздела является анализ вредных и опасных факторов возникающих при проведении нейтронно-физического расчёта и обоснование мер защиты от них. В разделе также рассматриваются вопросы безопасности в чрезвычайных ситуациях, анализ факторов, влияющих на обеспечение экологической безопасности.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Проведение нейтронно-физического расчёта требует длительной работы с ПВЭМ. В данном пункте будут рассмотрены основные правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, возникающие при проведении расчёта с использованием ПВЭМ.

4.1.1 Правовые нормы трудового законодательства

Категория работ определяется согласно СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Работа за ПК не предусматривает значительных физических нагрузок и

производится сидя. Таким образом, проведение нейтронно-физического расчёта относится к категории Ia [19].

Основным документом, декларирующим права работника на труд, является Трудовой кодекс Российской Федерации. Согласно Трудовому кодексу, для однородных работ могут разрабатываться и устанавливаться типовые (межотраслевые, отраслевые, профессиональные и иные) нормы труда. Для нейтронно-физического расчёта нормы устанавливаются согласно методическим рекомендациям по нормированию труда на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ШИФР 13.01.06 [20].

Основным документом, регламентирующим работы с ПВЭМ, является СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. К помещениям для работы с ПВЭМ предъявляется ряд требований [21]:

- не допускается размещение мест пользователей ПЭВМ во всех образовательных и культурно-развлекательных учреждениях для детей и подростков в цокольных и подвальных помещениях;
- полимерные материалы используются для внутренней отделки интерьера помещений с ПЭВМ при наличии санитарно-эпидемиологического заключения;
- помещения, где размещаются рабочие места с ПЭВМ, должны быть оборудованы защитным заземлением (занулением) в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации;
- не следует размещать рабочие места с ПЭВМ вблизи силовых кабелей и вводов, высоковольтных трансформаторов, технологического оборудования, создающего помехи в работе ПЭВМ.

4.1.2 Организация рабочего места исследователя

Организация и оборудование рабочих мест с ПВЭМ имеет ряд требований [21]:

- высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм, а при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм;

- рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм;

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать [21]:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400-550 мм и углам наклона вперед до 15° и назад до 5°;

- высоту опорной поверхности спинки 300 ± 20 мм, ширину - не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости - 400 мм;

- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах $\pm 30^\circ$;

- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260-400 мм;

- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной - 50-70 мм;

- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах 230 ± 30 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350-500 мм.

Рабочее место пользователя ПЭВМ следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

4.2 Производственная безопасность

4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в процессе исследования

В данном пункте представлен анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в процессе проведения расчёта, а также обоснование источников возникновения таких факторов и характер их воздействия на организм человека.

Неблагоприятные производственные факторы по результирующему воздействию на организм работающего человека подразделяют [22]:

- на вредные производственные факторы, то есть факторы, приводящие к заболеванию, в том числе усугубляющие уже имеющиеся заболевания;
- опасные производственные факторы, то есть факторы, приводящие к травме, в том числе смертельной.

В таблице 4.2.1.1 представлены основные опасные и вредные производственные факторы, возникающие при проведении расчёта.

Таблица 4.2.1.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1. Электрический ток	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
2. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
3. Превышение уровня шума	СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.
5. Повышенный уровень электромагнитных излучений	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
6. Психофизиологические факторы	ГОСТ 12.0.003-2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях [23]:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта аппаратуры;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развертки.

Действие электрического тока на живую ткань в отличие от других материальных факторов носит своеобразный и разносторонний характер. Проходя через организм, электрический ток производит, термическое, электролитическое и биологическое действия. Термическое действие проявляется в нагреве тканей вплоть до ожогов отдельных участков тела, перегрева кровеносных сосудов и крови, что вызывает в них серьезные функциональные расстройства. Электролитическое действие вызывает разложение крови и плазмы — значительные нарушения их физикохимических составов и ткани в целом. Биологическое действие выражается в раздражении и возбуждении живых тканей организма, что может сопровождаться непроизвольными судорожными сокращениями мышц, в том числе мышц сердца и легких. При этом могут возникнуть различные нарушения в организме, включая нарушение и даже полное прекращение деятельности сердца и легких, а также механические повреждения тканей.

Основными показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются: температура воздуха, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха [19].

Отклонение показателей от оптимальных значений может приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и

понижению работоспособности. Оптимальные величины показателей микроклимата производственных помещений при работе на ПЭВМ приведены в таблице 4.2.1.2 [19].

Таблица 4.2.1.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	60-40	0,1
Теплый	23-25	60-40	0,1

Шум при работе с ПЭВМ может возникнуть как при работе самой ПЭВМ непосредственно, так и ввиду наличия других шумных приборов в помещении с ПЭВМ. Шум с уровнем звукового давления до 35 дБ привычен для человека и не беспокоит его. Повышение этого уровня до 40 дБ создаёт значительную нагрузку на нервную систему, вызывая ухудшения самочувствия, а при длительном действии может быть причиной нервов. Воздействие шума уровнем свыше 80 дБ может привести к потере слуха профессиональной глухости. При действии уровней свыше 140 дБ возможен разрыв барабанных перепонки, контузия, а при уровне более 160 дБ наступает летальный исход. Допустимые значения уровней звукового давления приведены в таблице 4.2.1.3 [24].

Таблица 4.2.1.3 – Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука, создаваемого ПЭВМ

Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами									Уровни звука в дБА
31,5 Гц	63 Гц	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц	
86 дБ	71 дБ	61 дБ	54 дБ	49 дБ	45 дБ	42 дБ	40 дБ	38 дБ	50

При недостаточном освещении может возникать дополнительная нагрузка на зрительный анализатор, что приводит к ухудшению самочувствия исполнителя и может привести к ухудшению качества зрения.

Основные требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ следующие [21]:

- освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк (не допустимы блики на поверхности экрана);
- яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м²;
- яркость бликов на экране ПЭВМ не должна превышать 40 кд/м² и яркость потолка не должна превышать 200 кд/м².

При длительном воздействии ЭМИ повышенного уровня нарушается передача нервных импульсов. В результате появляются вегетативные дисфункции, жалобы на слабость, раздражительность, быструю утомляемость, нарушение сна нарушается высшая нервная деятельность - ослабление памяти, склонность к развитию стрессовых реакций. Нарушения деятельности сердечно-сосудистой системы проявляются, как правило, лабильностью пульса и артериального давления, склонностью к гипотонии, болями в области сердца. В крови отмечается умеренным снижением количества лейкоцитов и эритроцитов. Под действием ЭМИ увеличивается выработка адреналина, активизируется свертываемость крови, снижается активность гипофиза. ЭМИ высокой частоты приводят к нагреву тканей организма. Источниками электромагнитных излучений является ПЭВМ и другое электрооборудование. В таблице 4.2.1.4 представлены допустимые уровни электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ [21].

Таблица 4.2.1.4 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал видеомонитора		500 В

Опасные и вредные производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека, подразделяют [25]:

- на физические перегрузки, связанные с тяжестью трудового процесса;
- нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса.

В ходе проведения расчёта исполнитель испытывает в основном нервно-психические перегрузки:

- на умственное перенапряжение, в том числе вызванное информационной нагрузкой;
- перенапряжение анализаторов, в том числе вызванное информационной нагрузкой;
- монотонность труда.

4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя

Всю совокупность мер и способов защиты от поражения электрическим током можно разделить на две основные группы: организационные и технические. Организационные меры защиты от поражения электрическим током при работе с ПВЭМ включают [26]:

- назначение лиц, ответственных за организацию и безопасность производства работ;
- обучение персонала правилам производства работ и эксплуатации электротехнического оборудования;
- проведение инструктажей перед началом работ с электроустановками;
- организация надзора за проведением работ;
- установление рациональных режимов труда и отдыха;

- применение средств индивидуальной защиты, предупреждающих плакатов и знаков безопасности в соответствии с требованиями;
- изолирование и ограждение токоведущих частей электрооборудования.

К техническим мерам защиты от поражения электрическим током при работе с ПЭВМ включают [27]:

- электрическое разделение сети;
- применение защитного заземления, зануления; контроль и профилактика изоляции;
- защитное отключение.

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажностью воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования. В холодное время года предусматривается система отопления. Для отопления помещений используются водяные системы центрального отопления. При недостаточной эффективности центрального отопления должны быть использованы масляные электрические нагреватели. Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. Применение таких решеток способствует также повышению электробезопасности в помещениях. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли [28].

Шумящее оборудование (печатающие устройства, серверы), уровни шума которого превышают нормативные, должно размещаться вне помещений с ПЭВМ [26].

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях

преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения. Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях для использования ПЭВМ следует проводить чистку стекол оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп [21].

К мероприятиям по защите от действия ЭМП относятся: выбор режимов работы излучающего оборудования, обеспечивающего уровень излучения, не превышающий предельно допустимый, ограничение места и времени нахождения в зоне действия ЭМП (защита расстоянием и временем), обозначение и ограждение зон с повышенным уровнем ЭМП. Наибольшее значение при этом необходимо уделять выбору расстояния от источника излучения до рабочего места и сокращению времени пребывания человека в электромагнитном поле. Также для защиты от электромагнитных полей применяется их экранирование в местах пребывания человека [27].

Для снижения воздействия психофизиологических факторов необходимо организовать и соблюдать правильный режим труда и отдыха, а также организовать правильную компоновку рабочего места [28].

4.3 Экологическая безопасность

С середины 1990-х годов продукты электроники становятся общепризнанным доминирующим компонентом в общем потоке твердых отходов. Это связано с тем, что потребление небольших электронных устройств типа сотовых телефонов стало повсеместным во всех развитых и развивающихся странах. В отсутствие адекватной государственной политики по переработке таких отходов, из-за малого размера, короткого срока жизни и высокой стоимости их переработки такие изделия люди обычно выбрасывают, не задумываясь по поводу негативного воздействия их на окружающую среду и здоровье сограждан. Разрушающиеся на свалках электронные продукты и их компоненты (полупроводниковые чипы, компьютерные клавиатуры, мониторы, устройства хранения информации) становятся источниками поступающих в окружающую среду тысячи различных материалов, включая растворы

хлорированных веществ, бромированные препараты-гасители пламени, поливинилхлориды, тяжелые металлы, пластики, газы [29]. Одна только электронно-лучевая трубка может содержать от одного до трех килограммов свинца. В большом телевизионном мониторе его окажется еще больше. Плоские мониторы содержат меньше свинца, но больше ртути. Примерно 40 % тяжелых металлов, включая свинец, ртуть и кадмий, обнаруживаемых в окружающей среде, обязано своим присутствием выбрасываемым и попадающим на свалки электронным изделиям [30]. При сжигании отходов на открытых полигонах возникает особая проблема образования токсичных продуктов горения. Это относится, в частности, к пластмассам, используемым при изготовлении электронных средств. В этом случае характерно образование чрезвычайно опасных химических веществ – диоксинов. Особую опасность представляют PBDE, которые интенсивно выделяются в процессе горения пластмасс. Сейчас эти вещества запрещены к использованию, хотя в изделиях, произведенных до 2004 г., они содержатся в достаточно высоких количествах.

Значительные экологические и экономические выгоды сулит переработка отходов электронной промышленности и повторное их использование [31]. Она должна осуществляться путем разделения отходов на отдельные однородные компоненты, выделения химическими методами ценных для дальнейшего использования компонентов, направления их для повторного использования. Многие страны предпринимают серьезные шаги в этом направлении, в первую очередь в области законодательства и регламентирования процессов утилизации и хранения отходов производства. В 2002 г. Европейским союзом был разработан совместный документ – директива № 2002/96 «Об отходах электрического и электронного оборудования», которая требует от всех европейских производителей оборудования и комплектующих брать на себя ответственность за производимый продукт после окончания срока его службы, включая стадии сбора, переработки и утилизации. В Великобритании ввели запрет на выброс отработанной радиоэлектроники на мусорные свалки. В США и в Европе существуют специальные рынки, где

продаются демонтированные и восстановленные компоненты плат. В Германии фирма FUBA перевела на коммерческую основу выделение от 92 до 95 % металлов из отходов пустых печатных плат за счет использования механических и гидрометаллургических методов разделения [30].

При неправильной утилизации электроники происходят значительные загрязнения окружающей среды различными вредными веществами. Для снижения урона экологии необходимо обеспечить правильную утилизацию и переработку ПВЭМ и ВДТ.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией при проведении нейтронно-физического расчёта является пожар. Возможными причины загорания являются:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция, кабели.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные. 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 [32].

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды;
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования;
- правильное содержание зданий и территорий;
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководителю;
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры в соответствии с инструкцией.

Заключение

В настоящей работе были проведены расчёты нейтронно-физических параметров реактора типа ВВЭР-1000 одногрупповым методом и в программе WIMS-D5B, проведён расчёт отравления реактора Хе-135 и Sm-149. В результате расчётов определено:

- значение коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде и эффективного коэффициента размножения «холодного» реактора в одногрупповом приближении: $k_{\infty} = 1,248$ и $k_{эфф} = 1,232$;
- значение коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде и эффективного коэффициента размножения «горячего» реактора в одногрупповом приближении: $k_{\infty}^{zop} = 1,212$ и $k_{эфф}^{zop} = 1,174$;
- значение ТЭР и ТКР: $\rho_T = -0,03975$ и $\alpha = -2,3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.
- значение коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде и эффективного коэффициента размножения «холодного» реактора при расчёте в WIMS-D5B: $k_{\infty} = 1,261$ и $k_{эфф} = 1,244$;
- значение коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде и эффективного коэффициента размножения «горячего» реактора при расчёте в WIMS-D5B: $k_{\infty} = 1,226$ и $k_{эфф} = 1,210$;
- длительность кампании реактора – 400 суток
- оценочное значение КВ около 0,35;
- величина потери реактивности при стационарном отравлении реактора Хе-135 $\rho_0^{Xe} = -0,0283$, время выхода в стационар составило 33 часа;
- время достижения максимальной глубины «йодной ямы» $t_{\max}^{йя} \approx 8,18 \text{ ч}$;
- величина потери реактивности при стационарном отравлении реактора Sm-135 $\rho_0^{Sm} = -0,008$, время выхода в стационар составило 29 суток;
- глубина прометиевого провала $\rho_{п.п.} = -0,00303$.

В разделе финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение были получены следующие результаты:

- определение сильных и слабых сторон рассматриваемого объекта (SWOT-анализ) – реактора ВВЭР-1000 – показало, что данная установка ВВЭР-1000 в связи с отличными характеристиками имеет достаточно устойчивые перспективы для использования в качестве источника электроэнергии;

- бюджет научно-технического исследования составил 248513,04 руб;

- затраты на настоящее исследование практически не отличаются от затрат, которые осуществляются в ходе стандартной работы научного руководителя и исполнителя, не связанных с вовлечением в различные научные изыскания, за исключением расходов, связанных с проработкой проекта, а именно: часть налогов(НДС), прибыль и прочие расходы.

В разделе социальная ответственность были решены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при проведении нейтронно-физического расчёта. При рассмотрении производственной безопасности были выявлены вредные и опасные факторы: электрический ток;

- отклонение показателей микроклимата;

- превышение уровня шума;

- недостаточная освещенность рабочей зоны;

- повышенный уровень электромагнитных излучений;

- психофизиологические факторы.

Также был проведён анализ выявленных факторов, рассмотрены и обоснованы мероприятия по снижению уровня воздействия этих факторов.

В результате работы также были рассмотрены вопросы обеспечения экологической безопасности при утилизации ПВЭМ и ВДТ, вопросы обеспечения безопасности при возникновении пожара на рабочем месте.

Список использованных источников

1. Колпаков Г. Н. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие / Селиваникова О. В. – Томск: Издво Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
2. Жолдак Г. И. и др. Сухая защита реактора ВВЭР-1000 //Вестник МГСУ. – 2011. – №. 8.
3. Bojinov M. et al. Kinetic parameters of the oxidation of zirconium alloys in simulated WWER water–Effect of KOH content //Journal of nuclear materials. – 2008. – Т. 378. – №. 1. – С. 45-54.
4. Titov V. F. Status of steam generators for NPPs with WWER-1000 //Atomnaya Ehnergiya. – 1994. – Т. 77. – №. 2. – С. 100-107.
5. Saltanova I., Zhukova O. ASSESSMENT OF PUBLIC HEALTH RISK INDUCED BY THE ENVIRONMENTAL POLLUTION NEARBY NUCLEAR POWER PLANT CONSTRUCTION SITE //Sciences of Europe. – 2017. – №. 21-1 (21).
6. Presz W., Kaczorowski M. The TEM study of structure of 1H18N9T stainless steel buildups //Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – Т. 17. – №. 1-2.
7. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
8. Бойко В.И. и др. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие /Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н. – Томск: Томский государственный университет, 2002.
9. Колпаков Г.Н., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах. Часть I: Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 1997.

10. СТО ТПУ 2.5.01–2006. Система образовательных стандартов. Работы выпускные квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления. – Введ. 2006. – 04 – 30.
11. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: учебное пособие для вузов / Бартоломей Г. Г., Бать Г. А., Байбаков В. Д., Алхутов М. С – М., Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
12. ВВЭР – 1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность / Аль Афров А. М., Андрущенко С. А., Украинцев В. Ф., Васильев Б. Ю., Косоуков К. Б., Семченков Ю. М., Кокосадзе Э. Л., Иванов Е. А.. – М., Университетская книга, Логос, 2006. – 488 с.
13. WIMSD-IAEA Library [Электронный ресурс] / Url: <http://nucleus.iaea.org/CIR/CIR/WIMSDLibrary.pdf> – свободный. – Загл. с экрана. – Яз рус., англ. Дата обращения: 06.05.2020 г.
14. Lindley B. A. et al. Current status of the reactor physics code WIMS and recent developments //Annals of Nuclear Energy. – 2017. – Т. 102. – С. 148-157.
15. Thiyagarajan T. K. et al. A computer program with graphical user interface to plot the multigroup cross sections of WIMS-D library //Annals of Nuclear Energy. – 2002. – Т. 29. – №. 14. – С. 1735-1745.
16. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: Учебно-методическое пособие/ И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницына. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
17. Конусбаев Р. Е., Азылканова С. А. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ АЭС //Аллея науки. – 2018. – Т. 1. – №. 2. – С. 379-383.
18. Классификация. ГОСТ Р ИСО 26000-2012. Руководство по социальной ответственности.
19. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

20. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации [текст]: [федер. закон: принят Гос. Думой 21 дек. 2001 г.: по состоянию на 2 фев. 2020 г.]. – М.: Эксмо, 2020. – 224 с.– 5000 экз.

21. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

22. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы.

23. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

24. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.

25. Занько Н.Г., Малаян К.Р., Русак О.Н. Безопасность жизнедеятельности: Учебник / Под ред. О.Н. Русака. – 17-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 704 с.

26. Башлыков И. М. Методы и средства защиты человека от опасных и вредных производственных факторов //Современные проблемы науки и образования. – 2009. – №. 1. – С. 23-23.

27. Кривошеин Д.А., Дмитренко В.П., Горькова Н.В. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие. / Д.А. Кривошеин – СПб.: Издательство «Лань», 2019. – 340 с.

28. Босак, В.Н. Безопасность жизнедеятельности человека : учебник / В.Н. Босак, З.С. Ковалевич. – Минск : Высшая школа, 2016. – 335 с.

29. Аксенова О.В., Гузенкова А.С., Нерето М.О., Тумковский С.Р. Экологические проблемы электронной отрасли и экопроектирование. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2014, 4, 137.

30. Баранов О. Ю., Барашков В. А. Экологические проблемы производства и утилизации электронных средств //ISBN 978-5-7638-2687-6©

Сибирский федеральный университет, 2014© Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ, 2014. – 2014. – С. 497.

31. Boon J. E., Isaacs J. A., Gupta S. M. Economics of PC recycling //Environmentally conscious manufacturing. – International Society for Optics and Photonics, 2001. – Т. 4193. – С. 29-35.

32. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с.

Приложение А

Таблица А.1 – Макроскопические и микроскопические сечения и замедляющие способности для всех элементов

Материал	σ_a , барн	σ_f , барн	σ_c , барн	σ_s , барн	σ_{tr} , барн	ξ	Σ_a , см ⁻¹	Σ_f , см ⁻¹	Σ_c , см ⁻¹	Σ_s , см ⁻¹	Σ_{tr} , см ⁻¹	$\xi\Sigma_s$, см ⁻¹
U ²³⁵	500,474	426,466	74,009	15	515,474	0,00849	0,456	0,388	0,067	0,014	0,469	1,159·10 ⁻⁴
U ²³⁸	2,069	0	2,069	9	11,069	0,00838	0,045	0	0,045	0,197	0,242	0,00165
O _{топл}	0	0	0	3,75	3,6	0,12	0	0	0	0,171	0,164	0,02048
UO ₂	-	-	-	-	-	-	0,501	0,388	0,112	0,382	0,875	0,02224
H ₂ O	-	-	-	-	-	-	0,0221	0	0,0221	2,670	2,310	1,35000
Fe	1,931	0	1,931	11,4	13,217	0,03529	0,119	0	0,117	0,689	0,799	0,02432
Mn	10,381	0	10,381	2,3	12,658	0,03593	0,014	0	0,014	0,003	0,017	0,00011
Cr	2,366	0	2,366	4,2	6,524	0,03797	0,039	0	0,039	0,070	0,108	0,00264
Ni	3,511	0	3,511	17	20,341	0,03352	0,026	0	0,026	0,124	0,149	0,00416
Ti	4,427	0	4,427	4,2	8,585	0,04110	0,004	0	0,004	0,003	0,007	0,00014
Сталь	-	-	-	-	-	-	0,202	0	0,200	0,889	1,080	0,03137
He	0	0	0	0,855	0,712	4,25	0	0	0	2,3·10 ⁻⁵	1,91·10 ⁻⁵	9,764·10 ⁻⁵

Приложение Б

Таблица Б.1 – Макроскопические сечения взаимодействия и замедляющие способности для всех элементов для гомогенизированной ячейки (гомогенизация первого рода)

Материал	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_c, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$
U ²³⁵	0,1391	0,1185	0,0206	0,0042	0,1433	0,00004
U ²³⁸	0,0138	0	0,0138	0,0600	0,0738	0,00050
O _{топл}	0	0	0	0,0521	0,0500	0,00625
UO ₂	0,1529	0,1185	0,0344	0,1163	0,2671	0,00679
H ₂ O	0,0119	0	0,0119	1,4365	1,2428	0,72633
Fe	0,0143	0	0,0146	0,0845	0,0979	0,00298
Mn	0,0017	0	0,0017	0,0004	0,0020	0,00001
Cr	0,0048	0	0,0048	0,0085	0,0133	0,00032
Ni	0,0031	0	0,0031	0,0152	0,0182	0,00051
Ti	0,0004	0	0,0004	0,0004	0,0008	0,00002
Сталь	0,0244	0	0,0244	0,1090	0,1323	0,00385
He	0	0	0	$7,82 \cdot 10^{-7}$	$6,15 \cdot 10^{-7}$	$3,322 \cdot 10^{-6}$

Приложение В

Таблица В.1 – Макроскопические сечения взаимодействия и замедляющие способности для всех элементов для фиктивного блока и замедлителя (гомогенизация второго рода)

Материал	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_c, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$
U^{235}	0,3011	0,2566	0,0445	0,0090	0,3101	0,00008
U^{238}	0,0299	0	0,0299	0,1300	0,1598	0,00109
$\text{O}_{\text{топл}}$	0	0	0	0,1128	0,1083	0,01354
UO_2	0,3310	0,2566	0,0744	0,2518	0,5782	0,01470
H_2O	0,0221	0	0,0221	2,6700	2,3100	1,35000
Fe	0,0301	0	0,0310	0,1828	0,2120	0,00645
Mn	0,0036	0	0,0036	0,0008	0,0044	0,00003
Cr	0,0104	0	0,0104	0,0185	0,0287	0,00070
Ni	0,0068	0	0,0068	0,0329	0,0394	0,00110
Ti	0,0009	0	0,0009	0,0009	0,0018	0,00004
Сталь	0,0527	0	0,0497	0,2359	0,2863	0,00832
He	0	0	0	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$

Приложение Г

(обязательное)

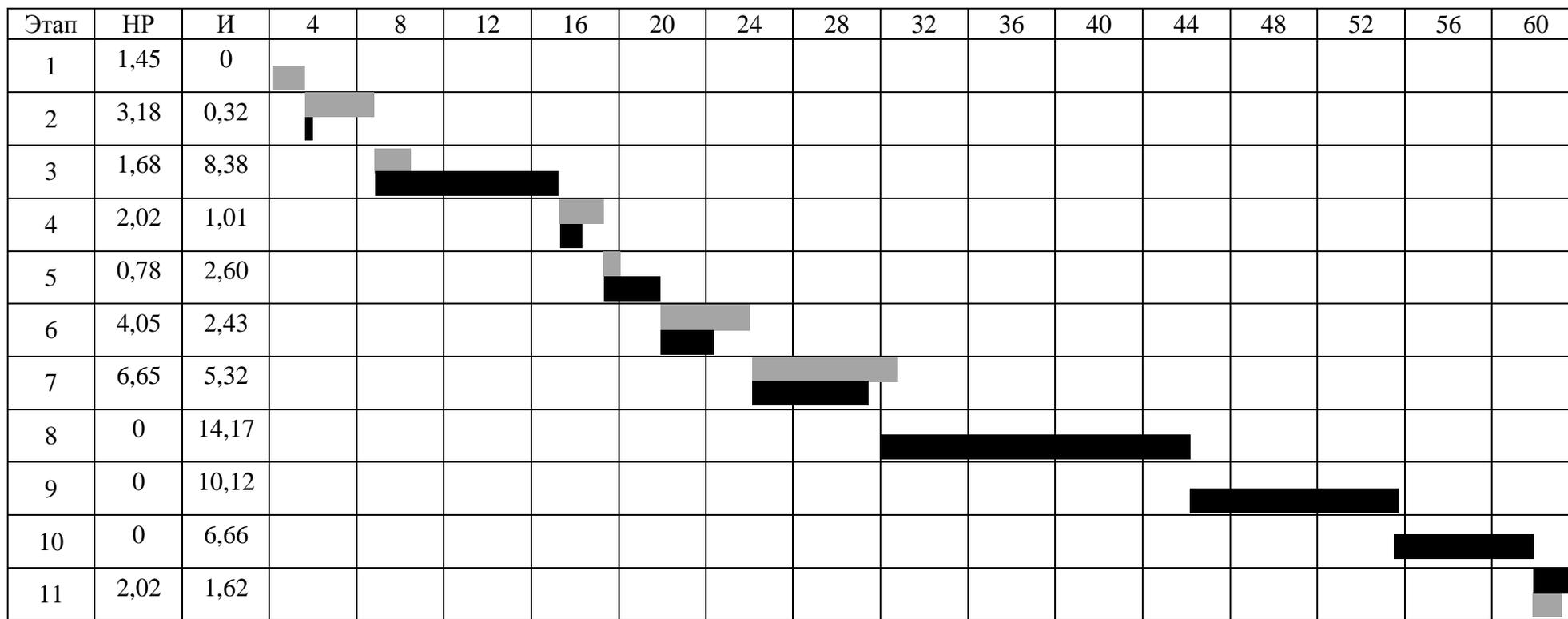
Таблица Г.1 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	$T_{РД}$		$T_{КД}$	
					НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	1	1	1,00	1,20	0	1,45	0
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	1	4	2,20	2,64	0,264	3,18	0,32
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	5	7	5,80	1,39	6,96	1,68	8,38
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,40	1,68	0,84	2,02	1,01
Обсуждение литературы	НР, И	1	3	1,80	0,65	2,16	0,78	2,60
Выбор исходных параметров	НР, И	2	4	2,80	3,36	2,02	4,05	2,43
Методика расчета	НР, И	3	7	4,60	5,52	4,42	6,65	5,32
Нейтронно-физический расчет ЯР	И	7	14	9,80	0	11,76	0	14,17
Оформление расчетно- пояснительной записки	И	5	10	7,00	0	8,40	0	10,12
Оформление графического материала	И	3	7	4,60	0	5,52	0	6,66
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,40	1,68	1,34	2,02	1,62
Итого:				42,40	18,12	43,68	21,83	52,62

Приложение Д

(обязательное)

Таблица Д.1 – Диаграмма Гантта



НР – ■; И – ■