

**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 Ядерные физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Расчет и анализ ядерного реактора типа ВВЭР с использованием программы WIMS

УДК 621.039.577:621.039.511

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Свешников Н.М.		

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	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 ОГСН ШИП	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
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Томск – 2020 г.

**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 Ядерные физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) 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	Свешникову Никите Максимовичу

Тема работы:

Расчет и анализ ядерного реактора типа ВВЭР с использованием программы WIMS

Утверждена приказом директора (дата, номер)

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

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	— Тип реактора: ВВЭР — Тепловая мощность реактора: 3200 [МВт] — Ядерное горючее: UO <sub>2</sub> — Обогащение топлива по U-235: 1,5 [%] — Теплоноситель: H <sub>2</sub> O — Температура теплоносителя на входе: 298 [°C] — Температура теплоносителя на выходе: 330 [°C] — Материал оболочек твэлов и кассет: циркалой – 2
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	— Расчёт «холодного и горячего» состояния реактора в однокрупном приближении — Оптимизация параметров реактора — Расчёт «холодного и горячего» состояния реактора в многокрупном приближении — Расчёт «холодного и горячего» состояний реактора в программе WIMS-D5 — Сравнение результатов

<b>Перечень графического материала</b>	— Презентация
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Киселева Е.С.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:</b>	
Нет	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	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	Свешников Н.М.		27.04.2020

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А6В	Свешникову Никите Максимовичу

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ЯТЦ</b>
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 %. – Ставка по НДС – 20%.

**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. Матрица SWOT
2. Бюджет проведения НИ
3. Диаграмма Ганта

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

**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	Свешников Никита Максимович		27.04.2020

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А6В	Свешников Никита Максимович

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Тема ВКР:

Синтез в воздушной плазме и исследование оксидных композиций «оксид неодима-оксид самария - оксид магния»
---

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: Ядерная установка ВВЭР. Область применения: атомная промышленность.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ:</li> <li>– ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</li> </ul>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные и опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– повышенный уровень электромагнитных излучений;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– психофизиологические факторы;</li> <li>– опасность поражения электрическим током.</li> </ul>
<p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду;</li> <li>– разработка организационных и технических мероприятий по защите окружающей среды.</li> </ul>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– выбор и описание типичной ЧС;</li> <li>– обоснование мероприятий по предотвращению ЧС;</li> <li>– порядок действий при возникновении ЧС.</li> </ul>

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

Задание выдал консультант:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		27.04.2020

Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А6В	Свешников Никита Максимович		27.04.2020

**Министерство науки и высшего образования 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) Ядерно-топливного цикла  
Период выполнения (весенний семестр 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.04.2020	<i>Выдача задания</i>	
30.04.2020	<i>Выбор конструктивной схемы</i>	
02.05.2020	<i>Расчёт в однокрупном приближении состояние реактора</i>	
03.05.2020	<i>Расчёт в многокрупном приближении состояние реактора</i>	
08.05.2020	<i>Расчёт состояния реактора в программе WIMS-D5</i>	
10.05.2020	<i>Сравнение результатов</i>	
06.06.2020	<i>Сдача работы</i>	

Составил преподаватель:

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

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные 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	<p>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).</p>
P9	<p>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.</p>
P10	<p>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.</p>
P11	<p>Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.</p>
P12	<p>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</p>



	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.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 109 с., 10 рис., 18 табл., 33 источников, 7 прил., 1 сборочный чертеж, 1 спецификация.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, отравление, нейтронно-физический расчёт, одnogрупповой расчёт, многогрупповой расчёт, WIMS-D5.

Объектом исследования является: водо-водяной энергетический реактор, тепловая мощность 3200 МВт, топливо  $UO_2$  с обогащением 1,5 %, теплоноситель – вода.

Цель работы – определение основных нейтронно-физических характеристик реактора типа ВВЭР тепловой мощностью 3200 МВт.

В ходе исследования произведен предварительный расчёт геометрических размеров активной зоны и скорость теплоносителя, нейтронно-физический расчёт реактора в одnogрупповом и многогрупповом приближении, расчёт «холодного» и «горячего» состояний реактора и длительность кампании с применением программы WIMS-D5. Также исследовано влияние стационарного отравления ксеноном, самалием.

Оценена финансовая составляющая, а также влияние вредных и опасных факторов, связанных с выполнением данной работы.

Область применения: ядерная энергетика.

## Оглавление

Введение.....	15
1. Обзор литературы .....	16
1.1. Ядерный реактор типа ВВЭР.....	16
1.2. Тепловыделяющие элементы ядерного реактора.....	19
1.3. Ядерное топливо .....	19
2. Нейтронно-физический расчёт реактора.....	21
2.1. Одногрупповой расчёт .....	21
2.1.1. Предварительный расчёт .....	21
2.1.2. Расчёт концентраций.....	24
2.1.3. Гомогенизация .....	25
2.1.4. Расчёт микроскопических и макроскопических сечений.....	29
2.1.5. Расчёт коэффициента размножения для бесконечной среды .....	32
2.1.6. Оптимизация параметров ячейки.....	36
2.1.7. Расчёт эффективного коэффициента размножения ЯР .....	38
2.1.8 Расчёт “горячего” состояния реактора.....	39
2.2 Многогрупповой расчёт .....	44
2.2.1 Расчёт многогрупповых констант .....	46
2.2.1.1 Подготовка групповых констант с учетом самоэкранировки .....	47
2.2.1.2 Подготовка констант.....	48
2.2.2 Расчёт эффективный коэффициент размножения .....	49
2.2.3 Определение длительности кампании и нуклидного состава ядерного топлива .....	50
2.3 Расчёт в программе WIMS-D5 .....	51

2.3.1	Расчет коэффициент размножения и длительности кампании .....	53
2.3.2	Определение потери реактивности при отравлении .....	56
2.4	Сравнение результатов расчета .....	59
3.1	Организация и планирование работ .....	61
3.1.1	Продолжительность этапов работ .....	62
3.2	Потенциальные потребители результатов исследования .....	65
3.3	Анализ конкурентных технических решений .....	66
3.4	SWOT-анализ .....	68
3.5	Расчёт накопления готовности проекта .....	71
3.6	Расчёт сметы на выполнение проекта .....	73
3.6.1	Расчёт затрат на материалы .....	73
3.6.2	Расчёт заработной платы .....	74
3.6.3	Расчёт затрат на страховые взносы .....	75
3.6.4	Расчёт затрат на электроэнергию .....	76
3.6.5	Расчёт амортизационных расходов .....	77
3.6.6	Расчёт прочих расходов .....	78
3.6.7	Расчёт суммарной себестоимости разработки .....	78
3.6.8	Расчёт прибыли .....	79
3.6.9	Расчёт НДС .....	79
3.6.10	Цена разработки проекта .....	79
3.6.11	Оценка экономической эффективности проекта .....	79
4	Социальная ответственность .....	81
4.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	81
4.1.1	Правовые нормы трудового законодательства .....	81

4.1.2 Организация рабочего места исследователя .....	83
4.2 Производственная безопасность.....	84
СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [20]. .....	85
СанПиН 2.2.4.3359–16.Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах [21]. .....	85
4.3 Экологическая безопасность.....	90
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	91
Заключение .....	95
Список литературы .....	97
Приложение А .....	101
Приложение Б.....	102
Приложение В.....	103
Приложение Г .....	104
Приложение Д.....	105
Приложение Е.....	106
Приложение Ё.....	107

## **Введение**

Цель данной работы: нейтронно-физический расчет реактора типа ВВЭР, состоящий в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров, удовлетворяющего поставленным требованиям.

Для достижения данных целей, произвести решение следующих задач:

- выбор рабочих параметров ядерного реактора;
- тепловой расчет ядерного реактора;
- нейтронно-физический расчет «холодного» и «горячего» состояния реактора;
- многогрупповой расчет ядерного реактора;
- расчет в программном комплексе WIMS-D5;
- Сравнение полученных результатов.

## 1. Обзор литературы

### 1.1. Ядерный реактор типа ВВЭР

Реактор ВВЭР (рисунок 1) является составной частью энергоблока АЭС и совместно с турбогенератором используется для производства электроэнергии в базовом режиме. Назначение реакторной установки – выработка сухого насыщенного пара для турбогенераторной установки, где тепловая энергия пара преобразуется в электрическую энергию [1].

Реактор ВВЭР является реактором корпусного типа с водой под давлением. Реактор энергетический ВВЭР предназначен для выработки тепловой энергии за счет цепной реакции деления атомных ядер. Реактор водородной, гетерогенный, корпусного типа, работающий на тепловых нейтронах с водо-водяным теплоносителем-замедлителем [2].

Реактор представляет собой вертикальный цилиндрический корпус с эллиптическим днищем, внутри которого размещается активная зона и внутрикорпусные устройства. Сверху реактора герметично закрыт крышкой с установленными на ней приводами механизмов и органов регулирования и защиты реактора, и патрубки для вывода кабелей датчиков внутриреакторного контроля. Крепление крышки к корпусу осуществляется шпильками.

В верхней части корпуса имеются патрубки для подвода и отвода теплоносителя, расположенные в два ряда, а также патрубки для аварийного подвода теплоносителя при разгерметизации первого контура.

В верхней части корпуса имеются патрубки для подвода и отвода теплоносителя, расположенные в два ряда, а также патрубки для аварийного подвода теплоносителя при разгерметизации первого контура.

Нагрев воды осуществляется в активной зоне за счет тепловыделение топливных элементов. ТВЭЛы заполнены слабообогащенным диоксидом урана-235. В настоящее время на всех АЭС с ВВЭР реализован трехлетний топливный

цикл, т.е. каждая ТВС используется в реакторе в течение трех кампаний.

В верхней части корпуса имеются патрубки для подвода и отвода

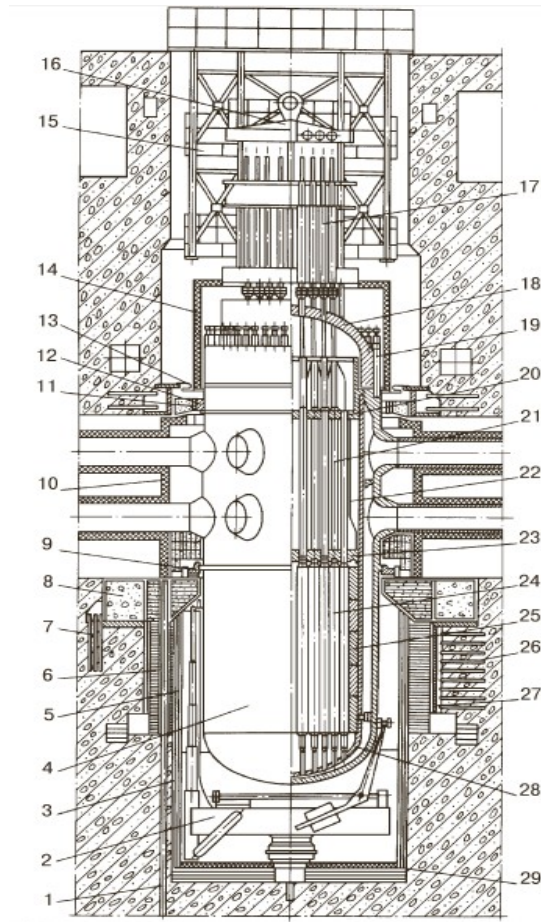


Рисунок 1 – Общий вид реактора ВВЭР: 1 – канал ионизационной камеры; 2 – машина осмотра корпуса; 3 – нижняя секция теплоизоляции; 4 – корпус реактора; 5 – верхняя секция теплоизоляции; 6 – металлоконструкция радиационно-тепловой защиты; 7 – анкерные связи опорной фермы; 8 – опорная ферма; 9 – опорное кольцо корпуса; 10 – теплоизоляция зоны патрубков; 11 – шпонка упорного кольца; 12 – упорное кольцо; 13 – сильфон; 14 – теплоизоляция ВБ; 15 – каркас; 16 – траверса; 17 – приводы СУЗ; 18 – крышка ВБ; 19 – шпилька ГРР; 20 – верхняя плита БЗТ; 21 – защитная труба БЗТ; 22 – БЗТ; 23 – нижняя плита БЗТ; 24 – ТВС; 25 – выгородка; 26 – анкерная связь обечайки бокса; 27 – обечайка бокса; 28 – шахта реактора с днищем; 29 – теплоизоляция нижней части.

теплоносителя, расположенные в два ряда, а также патрубки для аварийного



подвода теплоносителя при разгерметизации первого контура.

Нагрев воды осуществляется в активной зоне за счет тепловыделение топливных элементов. ТВЭЛЫ заполнены слабообогащенным диоксидом урана-235. В настоящее время на всех АЭС с ВВЭР реализован трехлетний топливный цикл, т.е. каждая ТВС используется в реакторе в течение трех кампаний.

Регулирование реактивности и, тем самым, тепловыделения, осуществляется перемещением органов регулирования с твердым поглотителем, а также изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе[3].

Реактор устанавливается в бетонной шахте, обеспечивающей надежное крепление реактора и биологическую защиту. Конструкция реактора и способ его закрепления, а также системы управления и защиты (СУЗ) и аварийного охлаждения зоны (СОАЗ) обеспечивают безопасную остановку и расхолаживание, в том числе при максимальном расчетном землетрясении 9 баллов по шкале MSK-64, а также обеспечивают прочность конструкции при одновременном воздействии нагрузок, вызванных максимальным расчетным землетрясением и разрывом трубопровода Ду 850 по полному сечению.

В соответствии с принятой классификацией по безопасности реактор относится к устройствам нормальной эксплуатации и обеспечивает осуществление технологических процессов в нормальных условиях эксплуатации (разогрев, выход на мощность, работа на мощности, остановка, расхолаживание и перегрузка топлива). Срок службы оборудования реактора 30 лет. Расчетный срок службы корпуса и крышки реактора 40 лет.

ВВЭР обладает следующими достоинствами:

- удачное использование воды в качестве теплоносителя и замедлителя;
- доступность, следовательно, дешевизна воды;
- наличие высокой замедляющей способности, следовательно, высокое энерговыделение с единицы объема;
- большие удельная и объемная мощности при относительно

небольших габаритах и умеренных критических нагрузках реактора;

- вода как теплоноситель эффективно отводит тепло.

Недостатки реактора типа ВВЭР, обусловленные в основном водой:

– относительно высокое поглощение нейтронов водой, а поэтому должно использоваться только обогащенное топливо;

– возможность неравномерного распределения энерговыделения, из-за сильного замедления нейтронов в воде;

– коррозионная активность воды с конструкционными материалами, что приводит к использованию двуокиси урана и нержавеющей стали, это ухудшает баланс нейтронов увеличивает затраты на эксплуатацию;

- высокое давление при энергетически приемлемых температурах;

- тепловой поток ограничен критическими тепловыми нагрузками.

### **1.2. Тепловыделяющие элементы ядерного реактора**

ТВЭЛ ядерного реактора ВВЭР – это трубка, заполненная таблетками двуокиси урана, которая герметично уплотнена концевыми деталями на сварке. В качестве материала для изготовления трубок ТВЭЛ традиционно применяется рекристаллизованный сплав циркония с 1 % ниобия.

### **1.3. Ядерное топливо**

В качестве ядерного топлива в реакторах ВВЭР применяют двуокись урана.  $UO_2$  имеет следующие свойства:

- $T_{пл} = 2800 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- гранецентрированная решетка;
- $\rho = 10,97 \text{ г/см}^3$ .

Радиационная стойкость двуокиси урана определяется:

- накоплением продуктов деления, имеющих больший объем, чем разделившиеся атомы;
- рост отдельных зерен в результате выбивания атомов из узлов кристаллической решетки и внедрения в решетку продуктов деления;
- образование и рост пор.

Недостатком двуокиси урана является то, что  $UO_2$  обладает низким коэффициентом теплопроводности, что значительно обуславливает температурные градиенты, что в свою очередь приводит к большим термическим напряжениям, следовательно, к разрушению [4].

## 2. Нейтронно-физический расчёт реактора

### 2.1. Одногрупповой расчет

#### 2.1.1. Предварительный расчет

Для расчета нейтронно-физических параметров реактора на тепловых нейтронах требуется определить размеры активной зоны данного реактора для обеспечения нужного теплосъема при заданной мощности аппарата. Все необходимые величины для расчета указаны в таблице 1.

Таблица 1 - Рабочие параметры реактора

Тепловая мощность	N, МВт	3200
Средняя удельная объемная нагрузка	N <sub>0</sub> , кВт/л	120
Отношение высоты к диаметру	m	1,1
Коэффициент увеличения объёма АЗ за счёт СУЗ	n	1,1
Объемный коэффициент неравномерности	K <sub>v</sub>	2
Осевой коэффициент неравномерности	K <sub>z</sub>	1,4
Размер элементарной ячейки под ключ	h(яч), см	1,275
Внешний диаметр ТВЭЛа	D(ТВЭЛ), см	0,91
Температура теплоносителя на входе	t(вх), °С	298
Температура теплоносителя на выходе	t(вых), °С	330
Теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении	C <sub>p</sub> , ккал/(кг·градус)	1,4
Плотность теплоносителя при рабочей температуре	ρ, г/см <sup>3</sup>	0,697

Исходя из требуемой мощности реактора, размеры активной зоны можно оценить следующим образом:

$$V_{a.z.} = \frac{N}{N_0} \cdot n, [M^3]; \quad (1)$$

$$D_{a.z.} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{a.z.}}{\pi \cdot m}}, [M]; \quad (2)$$

$$H_{a.z.} = m \cdot D_{a.z.}, [M], \quad (3)$$

где  $V_{a.з.}$ ,  $D_{a.з.}$ ,  $H_{a.з.}$  - объем, диаметр, высота активной зоны.

Вследствие размещения регулирующих стержней СУЗ максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = N_0 \cdot K_V, [\text{кВт} / \text{л}], \quad (4)$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{116 \cdot \Pi_0}, [\text{Гкал} / \text{м}^2 \cdot \text{ч}], \quad (5)$$

где  $\Pi_0$  – параметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛ, см;

$S_{\text{яч}}$  – площадь сечения элементарной ячейки, см<sup>2</sup>.

Необходимая для отвода тепла скорость определяется в максимально напряженно тепловыделяющем элементе из следующего выражения:

$$u = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{a.з.}}{3,6 \cdot K_Z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{тн}}}, [\text{м} / \text{с}], \quad (6)$$

где  $u$  – скорость прокачки теплоносителя;

$K_Z$  – осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

$S_{\text{тн}}$  – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один ТВЭЛ, см<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность теплоносителя при рабочих параметрах, г/см<sup>3</sup>;

$\Delta i$  – разность теплосодержания теплоносителя на входе и выходе, ккал/кг.

Данная величина находится по следующей формуле:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), [\text{ккал} / \text{кг}], \quad (7)$$

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

$t_{\text{вых}}$ ,  $t_{\text{вх}}$  – температура теплоносителя на входе и выходе, °С.

Объем активной зоны:

$$V_{a.з.} = \frac{N}{N_0} \cdot n = \frac{3200 \cdot 1,1}{120} = 29,33 \text{ м}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{a.z.} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{a.z.}}{\pi \cdot m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 29,33}{3,14 \cdot 1,1}} = 3,23 \text{ м.}$$

Высота активной зоны:

$$H_{a.z.} = m \cdot D_{a.z.} = 1,1 \cdot 3,23 = 3,56 \text{ м.}$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = N_0 \cdot K_V = 120 \cdot 2 = 240 \text{ кВт / л.}$$

Площадь сечения элементарной ячейки:

$$S_{яч} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{h_{яч}}{2}\right)^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{1,275}{2}\right)^2 = 1,407833 \text{ см}^2.$$

Периметр тепловыделяющей поверхности твэла:

$$P_0 = \pi \cdot D_{твэл} = 3,14 \cdot 0,91 = 2,8574 \text{ см.}$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{яч}}{116 \cdot P_0} = \frac{240 \cdot 1,407833}{116 \cdot 2,8574} = 1,019373 \text{ Гкал / м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Площадь сечения твэла:

$$S_{твэл} = \pi \cdot \frac{D_{твэл}^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,91^2}{4} = 0,65 \text{ см}^2.$$

Разность теплосодержания теплоносителя на входе и выходе:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,43 \cdot (330 - 298) = 44,8 \text{ ккал / кг...}$$

Площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на 1 твэл:

$$S_{тн} = S_{яч} - S_{твэл} = 1,407833 - 0,65 = 0,757774 \text{ см}^2.$$

Скорость прокачки теплоносителя:

$$u = \frac{q_{\max} \cdot P_0 \cdot H_{a.z.}}{3,6 \cdot K_Z \cdot p \cdot \Delta i \cdot S_{тн}} = \frac{1,019373 \cdot 2,8574 \cdot 3,56 \cdot 10^2}{3,6 \cdot 1,4 \cdot 0,697 \cdot 44,8 \cdot 0,757774} = 8,695 \text{ м / с.}$$

Таким образом, получившаяся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет установленным требованиям ( $u < 10$  м/с – для реакторов типа ВВЭР).

### 2.1.2. Расчет концентраций

Поскольку ячейка реактора состоит из нескольких зон с различными ядерными свойствами, необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, коэффициенты диффузии, замедляющие свойства) для каждой зоны; оболочка – Циркалой-2, теплоноситель и замедлитель – легкая вода  $H_2O$ .

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

$$N = \frac{N_a \cdot \rho}{A}, [\text{ядер} / \text{см}^3], \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>;

$N_a$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;

$A$  – атомный вес элемента, г/моль.

Топливом является двуокись урана ( $UO_2$ ), обогащенная по  $U^{235}$  на 1,5%, поэтому ядерная концентрация топлива рассчитывается следующим образом:

$$N = \frac{N_a \cdot \rho}{A_{UO_2}} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 10,2}{270} = 2,27422 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3.$$

Расчет концентрации отдельных элементов, входящих в состав топлива, осуществляется следующим образом:

$$N_{U^{235}} = C_{U^{235}} \cdot N_{UO_2} = 0,015 \cdot 2,27422 \cdot 10^{22} = 3,41133 \cdot 10^{20} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{U^{238}} = (1 - C_{U^{235}}) \cdot N_{UO_2} = (1 - 0,015) \cdot 2,27422 \cdot 10^{22} = 2,24011 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_0(\text{мон}) = 2 \cdot N_{UO_2} = 2 \cdot 2,27422 \cdot 10^{22} = 4,54844 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3.$$

Теплоносителем в данном ядерном реакторе служит вода:

$$N_{H_2O} = \frac{N_a \cdot \rho}{A_{H_2O}} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1}{18} = 3,344 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_o(\text{тн}) = N_{H_2O} = 3,344 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_H = 2 \cdot N_{H_2O} = 6,688 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3.$$

В качестве оболочки твэла используется циркониевый сплав Циркалой-2. Его состав: цирконий – 98 %, олово – 1,5 %, железо – 0,2 %, хром – 0,15 %, водород – 0,15 % . Соответственно, рассчитаем концентрации каждой компоненты, входящей в состав сплава:

$$N_{Zr} = C_{Zr} \cdot \frac{N_a \cdot p_{сплва}}{A_{сплва}} = 0,98 \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 6,506}{91} = 4,21789 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{Sn} = C_{Sn} \cdot \frac{N_a \cdot p_{сплва}}{A_{сплва}} = 0,015 \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 6,506}{91} = 6,45595 \cdot 10^{20} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{Fe} = C_{Fe} \cdot \frac{N_a \cdot p_{сплва}}{A_{сплва}} = 0,002 \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 6,506}{91} = 8,6079 \cdot 10^{19} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{Cr} = C_{Cr} \cdot \frac{N_a \cdot p_{сплва}}{A_{сплва}} = 0,0015 \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 6,506}{91} = 6,45595 \cdot 10^{19} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_H = C_H \cdot \frac{N_a \cdot p_{сплва}}{A_{сплва}} = 0,0015 \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 6,506}{91} = 6,45595 \cdot 10^{19} \text{ ядер} / \text{см}^3.$$

При изготовлении в твэлы закачивается гелий, тогда его концентрация будет равна:

$$N_{He} = \frac{N_a \cdot p_{He}}{A_{He}} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,00017846}{4} = 2,68582 \cdot 10^{19} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

### 2.1.3. Гомогенизация

Для проведения гомогенизации были приняты геометрические величины, представленные в таблице 2.

Таблица 2 - Геометрические величины активной зоны реактора

Внешний радиус твэла (оболочки), см	0,455
Внутренний радиус твэла (топлива), см	0,07
Внутренний радиус оболочки, см	0,39
Внешний радиус топлива, см	0,3765
Площадь сечения твэла, см <sup>2</sup>	0,65
Площадь сечения замедлителя-теплоносителя, см <sup>2</sup>	0,758
Площадь сечения ячейки, см <sup>2</sup>	1,407



## Гомогенизация первого вида

Необходимо представить элементарную ячейку в виде однородной гомогенизированной смеси. Эскиз данной ячейки изображен на рисунке 2, где обозначена гомогенизированная смесь элементов, входящих в ячейку.

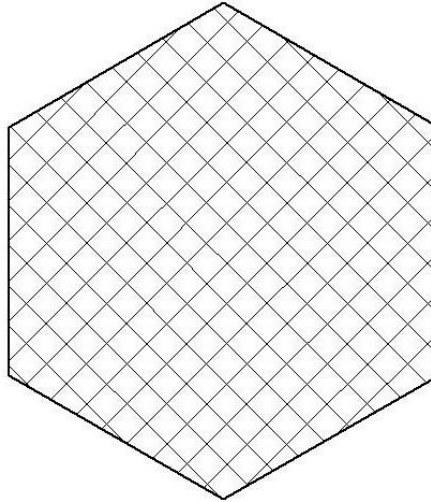


Рисунок 2 – Элементарная ячейка после гомогенизации

Ядерные концентрации гомогенизированных элементов находятся по следующей формуле:

$$N_i^z = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{яч}}, [\text{ядер} / \text{см}^3], \quad (9)$$

где  $N_i$  – гетерогенная ядерная концентрация  $i$ -го элемента, ядер/см<sup>3</sup>;

$S_i$  – площадь сечения  $i$ -го элемента в элементарной ячейке, см<sup>2</sup>.

Рассчитаем площади сечения недостающих элементов:

$$S_{мон} = \pi \cdot (R_{мон}^2 - r_{твэл}^2) = 3,14 \cdot (0,3765^2 - 0,07^2) = 0,4297 \text{ см}^2;$$

$$S_{об} = \pi \cdot (R_{твэл}^2 - r_{об}^2) = 3,14 \cdot (0,455^2 - 0,39^2) = 0,1725 \text{ см}^2;$$

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

Концентрации после гомогенизации будут равны:

$$N_{U^{235}}^2 = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{mon}}{S_{яч}} = \frac{1,092 \cdot 10^{20} \cdot 0,4297}{1,407} = 3,334 \cdot 10^{20}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_{U^{238}}^2 = \frac{N_{U^{238}} \cdot S_{mon}}{S_{яч}} = \frac{2,24011 \cdot 10^{22} \cdot 0,4297}{1,407} = 6,84158 \cdot 10^{21}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_{O}^2(mon) = \frac{N_{O}(mon) \cdot S_{mon}}{S_{яч}} = \frac{4,54844 \cdot 10^{22} \cdot 0,4297}{1,407} = 1,38915 \cdot 10^{22}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_H^2 = \frac{N_H \cdot S_{мн}}{S_{яч}} = \frac{6,692 \cdot 10^{22} \cdot 0,758}{1,407} = 3,60354 \cdot 10^{22}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_{O}^2(мн) = \frac{N_O \cdot S_{мн}}{S_{яч}} = \frac{3,34444 \cdot 10^{22} \cdot 0,758}{1,407} = 1,80177 \cdot 10^{22}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_{Zr}^2 = \frac{N_{Zr} \cdot S_{об}}{S_{яч}} = \frac{4,21789 \cdot 10^{22} \cdot 0,1725}{1,407} = 5,17012 \cdot 10^{21}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_{Sn}^2 = \frac{N_{Sn} \cdot S_{об}}{S_{яч}} = \frac{6,45595 \cdot 10^{20} \cdot 0,1725}{1,407} = 7,91345 \cdot 10^{19}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_{Fe}^2 = \frac{N_{Fe} \cdot S_{об}}{S_{яч}} = \frac{8,60794 \cdot 10^{19} \cdot 0,1725}{1,407} = 1,05513 \cdot 10^{19}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_{Cr}^2 = \frac{N_{Cr} \cdot S_{об}}{S_{яч}} = \frac{6,45595 \cdot 10^{19} \cdot 0,1725}{1,407} = 7,91345 \cdot 10^{18}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_H^2 = \frac{N_H \cdot S_{об}}{S_{яч}} = \frac{6,45595 \cdot 10^{19} \cdot 0,1725}{1,407} = 7,91345 \cdot 10^{18}, [\text{ядер} / \text{см}^3];$$

$$N_{He}^2 = \frac{N_{He} \cdot S_{He}}{S_{яч}} = \frac{2,68582 \cdot 10^{19} \cdot 0,0478}{1,407} = 9,13942 \cdot 10^{17}, [\text{ядер} / \text{см}^3].$$

## Гомогенизация второго вида

В данном случае необходимо разделить гетерогенную элементарную ячейку на две гомогенизированные зоны: замедлитель-теплоноситель и фиктивный блок. Эскиз данной ячейки изображен на рисунке 3, где горизонтальной штриховкой обозначен замедлитель-теплоноситель (H<sub>2</sub>O), окружностью меньшего диаметра отмечена гомогенизированная смесь элементов твэла.

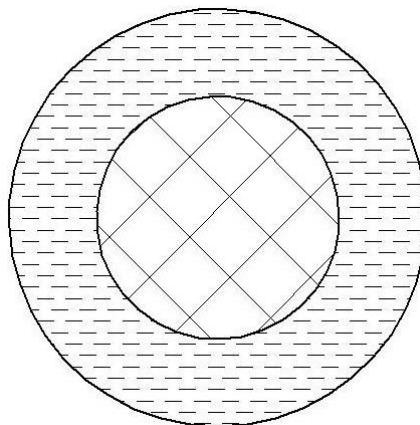


Рисунок 3 – Элементарная ячейка после гомогенизации второго вида

Ядерные концентрации элементов замедлителя-теплоносителя остаются неизменными, по сравнению, с гетерогенной ячейкой, так как:

$$N_i^{z2} = \frac{N_i \cdot S_{mn}}{S_{mn}} = N_i, [\text{ядер} / \text{см}^3]. \quad (10)$$

Соответственно:

$$N_H^{z2} = N_H = 6,68889 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_O^{z2}(mn) = N_H(mn) = 3,3444 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3.$$

Ядерные концентрации элементов твэла рассчитываются по следующей формуле:

$$N_i^{z2} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{твэп}}, [\text{ядер} / \text{см}^3]. \quad (11)$$

Соответственно:

$$N_{U^{235}}^{z2} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{mon}}{S_{твэл}} = \frac{1,092 \cdot 10^{21} \cdot 0,4297}{0,65} = 7,22 \cdot 10^{20} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{U^{238}}^{z2} = \frac{N_{U^{238}} \cdot S_{mon}}{S_{твэл}} = \frac{2,14011 \cdot 10^{22} \cdot 0,4297}{0,65} = 1,48094 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{O}^{z2}(mon) = \frac{N_O(mon) \cdot S_{mon}}{S_{твэл}} = \frac{4,54844 \cdot 10^{22} \cdot 0,4297}{0,65} = 3,00698 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{Zr}^{z2} = \frac{N_{Zr} \cdot S_{об}}{S_{твэл}} = \frac{4,21789 \cdot 10^{22} \cdot 0,1724645}{0,65} = 1,11913 \cdot 10^{22} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{Sn}^{z2} = \frac{N_{Sn} \cdot S_{об}}{S_{твэл}} = \frac{6,45595 \cdot 10^{20} \cdot 0,1724645}{0,65} = 1,71296 \cdot 10^{20} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{Fe}^{z2} = \frac{N_{Fe} \cdot S_{об}}{S_{твэл}} = \frac{8,60794 \cdot 10^{19} \cdot 0,1724645}{0,65} = 2,28394 \cdot 10^{19} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{Cr}^{z2} = \frac{N_{Cr} \cdot S_{об}}{S_{твэл}} = \frac{6,45595 \cdot 10^{19} \cdot 0,1724645}{0,65} = 1,71296 \cdot 10^{19} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_H^{z2} = \frac{N_H \cdot S_{об}}{S_{твэл}} = \frac{6,45595 \cdot 10^{19} \cdot 0,1724645}{0,65} = 1,71296 \cdot 10^{19} \text{ ядер} / \text{см}^3;$$

$$N_{He}^{z2} = \frac{N_{He} \cdot S_{He}}{S_{твэл}} = \frac{2,6874 \cdot 10^{19} \cdot 0,0478779}{0,65} = 1,97833 \cdot 10^{18} \text{ ядер} / \text{см}^3.$$

#### 2.1.4. Расчет микроскопических и макроскопических сечений

Так как приведенные в справочниках значения сечений указаны для энергии нейтронов, равной 0,0252 эВ, то есть тепловые нейтроны. При нейтронно-физических расчетах все поперечные сечения должны быть отнесены к средней скорости нейтронов. Спектр Максвелла для тепловых нейтронов постепенно переходит в спектр замедляющихся нейтронов при температуре 293 К и при энергии примерно равной  $E = 0,2$  эВ, которая называется «энергией сшивки». В реальных средах распределение тепловых нейтронов не совпадает в точности с распределением Максвелла, поскольку имеет место поглощение тепловых нейтронов (спектр сдвинут в область больших энергий). Для удобства расчетов в теории реакторов принято, что тепловые нейтроны распределены по спектру Максвелла, но имеют более высокую эффективную температуру

(температура нейтронного газа –  $T_{н.г.}$ ), которая превышает температуру замедлителя. Поперечные сечения поглощения и деления, отнесенные к средней скорости тепловых нейтронов, определяются по формуле:

$$\sigma_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,886 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, [\text{барн}]; \quad (12)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f_0} \cdot 0,886 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, [\text{барн}], \quad (13)$$

где  $\sigma_{a_0}, \sigma_{f_0}$  – табличные сечения;

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

В тепловых реакторах температура нейтронного газа превышает температуру среды на 100 градусов. Принимаем  $T_{н.г.}=393$  К.

Микроскопические сечения рассеяния практически не зависят от энергии тепловых нейтронов, поэтому непосредственно можно воспользоваться для них табличными данными [5]. Макроскопические поперечные сечения вычисляются следующим образом:

$$\Sigma_i = \sigma_i \cdot N_i, [\text{см}^{-1}]; \quad (14)$$

$$\sigma_i^{tr} = \sigma_i^a + \sigma_i^{in} + \sigma_i^e \cdot (1 - \mu_s^i). \quad (15)$$

Замедляющую способность вещества можно найти по соотношению:

$$\xi \Sigma_{S_i} = \sum_{i=1}^m \xi_i \cdot \Sigma_{S_i}, \quad (16)$$

где  $\xi_i$  – логарифмический декремент.

Логарифмический декремент определяется следующим образом:

$$\xi_i = 1 + \frac{(A_i + 1)^2}{2 \cdot A_i} \cdot \ln\left(\frac{A_i - 1}{A_i + 1}\right). \quad (17)$$

Для смеси веществ логарифмический декремент определяется следующим образом:

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^m \xi_i \cdot \Sigma_{S_i}}{\sum_{i=1}^m \Sigma_{S_i}}. \quad (18)$$

Для гомогенных смесей и гетерогенных сред, рассматриваемых как гомогенные, все макроскопические сечения вычисляются по общему правилу:

$$\Sigma_i = \sum_{i=1}^m N_i^2 \cdot \sigma_i. \quad (19)$$

### Расчет микроскопических и макроскопических сечений для $U^{235}$

$f_a = 0,96133$  – поправочный коэффициент для  $U^{235}$ ;

$f_f = 0,96133$  – поправочный коэффициент для  $U^{235}$ ;

$\sigma_{a_0} = 683$  барн – табличное значение сечения поглощения  $U^{235}$ ;

$\sigma_{f_0} = 582$  барн – табличное значение сечения деления  $U^{235}$ .

Тогда, с учетом поправок, сечения для  $U^{235}$  пересчитываются по формулам (12) и (13):

$$\sigma_a = 683 \cdot 0,886 \cdot 0,96133 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 502,3015 \text{ барн};$$

$$\sigma_a = 582 \cdot 0,886 \cdot 0,96133 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 428,0226 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{U^{235}} = 15 \text{ барн};$$

$$\sigma_c^{U^{235}} = 101 \text{ барн};$$

$$\mu_s^{U^{235}} = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{U^{235}} = 502,3015 + 15 \cdot (1 - 0) = 517,3015 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 502,3015 \cdot 10^{-24} \cdot 1,092 \cdot 10^{21} = 0,545 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 428,0226 \cdot 10^{-24} \cdot 1,092 \cdot 10^{21} = 0,466 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 1,092 \cdot 10^{21} = 0,016 \text{ см}^{-1};$$

$$\begin{aligned}
\Sigma_{tr}^{U^{235}} &= 517,3015 \cdot 10^{-24} \cdot 1,092 \cdot 10^{21} = 0,561 \text{ см}^{-1}; \\
\xi^{U^{235}} &= 1 + \frac{235-1}{235+1} \cdot \ln\left(\frac{235-1}{235+1}\right) = 0,008487; \\
\xi \Sigma_S^{U^{235}} &= 0,008487 \cdot 0,016 = 0,000135 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_a^{U^{235}}(z1) &= 502,3015 \cdot 10^{-24} \cdot 3,334 \cdot 10^{20} = 0,171 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_f^{U^{235}}(z1) &= 428,0226 \cdot 10^{-24} \cdot 3,334 \cdot 10^{20} = 0,142 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_S^{U^{235}}(z1) &= 15 \cdot 10^{-24} \cdot 3,334 \cdot 10^{20} = 0,005 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_C^{U^{235}}(z1) &= 101 \cdot 10^{-24} \cdot 3,334 \cdot 10^{20} = 0,034 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_{tr}^{U^{235}}(z1) &= 517,3015 \cdot 10^{-24} \cdot 3,334 \cdot 10^{20} = 0,171 \text{ см}^{-1}; \\
\xi \Sigma_S^{U^{235}}(1z) &= 0,008487 \cdot 0,005 = 4,244 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_a^{U^{235}}(z2) &= 502,3015 \cdot 10^{-24} \cdot 7,22 \cdot 10^{20} = 0,36 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_f^{U^{235}}(z2) &= 428,0226 \cdot 10^{-24} \cdot 7,22 \cdot 10^{20} = 0,308 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_S^{U^{235}}(z2) &= 15 \cdot 10^{-24} \cdot 7,22 \cdot 10^{20} = 0,011 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_C^{U^{235}}(z2) &= 101 \cdot 10^{-24} \cdot 7,22 \cdot 10^{20} = 0,073 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_{tr}^{U^{235}}(z2) &= 517,3015 \cdot 10^{-24} \cdot 7,22 \cdot 10^{20} = 0,371 \text{ см}^{-1}; \\
\xi \Sigma_S^{U^{235}}(2z) &= 0,008487 \cdot 0,01 = 9,191 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.
\end{aligned}$$

Для остальных элементов результаты расчет микроскопических и макроскопических сечений представлены в приложении Б и в приложении В.

### 2.1.5. Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды

#### Расчет коэффициента выхода нейтронов на одно поглощение

Топливо применяется в виде сплава и выражение для  $\eta$  имеет вид:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_f^{mon}}{\Sigma_a^{mon}}, \quad (20)$$

где  $\nu_f$  – число нейтронов, которое испускается при одном акте деления.

$$\eta = 2,42 \cdot \frac{0,466}{0,589} = 1,922547.$$

### Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах

Величина  $\mu$  (коэффициент размножения на быстрых нейтронах) в гетерогенном реакторе зависит от формы, размеров и расположения топливного блока, а также от диффузионных свойств топлива.

Величина  $\mu$  для стержневых и трубчатых ТВЭЛов можно вычислить по формуле:

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_{\infty} - \mu_{\text{бл}}}{1 + 2,3 \frac{N_H}{N_{U^{238}}}} \quad (21)$$

где  $\mu_{\infty} = 1,19$ ;

$\frac{N_H}{N^{238}}$  – отношение числа атомов водорода к числу атомов урана в активной зоне;

$\mu_{\text{бл}}$  – коэффициент размножения на быстрых нейтронах для одиночного блока, но помещенного в разреженную решетку.

Уран-водное отношение  $\frac{N_H}{N^{238}}$  находится следующим образом:

$$\frac{N_H}{N^{238}} = \frac{S_{H_2O} \cdot H_{a.z.} \cdot p_{H_2O} \cdot 238}{S_{UO_2} \cdot H_{a.z.} \cdot p_{UO_2} \cdot 18 \cdot (1 - C_{U^{235}})} = 2 \cdot \frac{0,758 \cdot 1 \cdot 238}{0,455 \cdot 10,2 \cdot 18 \cdot (1 - 0,015)} = 4,734;$$

$$\mu_{\text{бл}} = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \cdot \mu_1 \quad (22)$$

где  $P$  – вероятность того, что быстрый нейтрон испытывает какое-либо столкновение с ядром  $U^{238}$ ;

$\mu_1$  – пористость блока по  $U^{238}$ ;

$N^{U^{238}_{\text{природ}}}$  – число ядер  $U^{238}$  в 1 см<sup>3</sup> естественного урана;

$N^{U^{238}}$  – число ядер  $U^{238}$  в 1 см<sup>3</sup> блока.



$$\mu_1 = \frac{N^{U^{238}}}{N^{U^{238}_{\text{природ}}}} = \frac{2,24011 \cdot 10^{22}}{\frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 19,05}{238}} = 0,454.$$

Для  $R_{\text{топ}} = 0,3765$  см принимаем  $P = 0,1$ :

$$\mu_{\text{бл}} = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} \cdot 0,454 = 1,001;$$

$$\mu = 1,001 + \frac{1,19 - 1,001}{1 + 2,3 \cdot 4,734} = 1,017$$

### Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов

Для расчета данного коэффициента можно использовать второй вид гомогенизации, при котором гетерогенная ячейка заменяется двухзонной.

Расчет  $\theta$  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:

$$\frac{1}{\theta_{\text{ф.б.}}} = 1 + F \cdot \frac{S_{\text{зам}} \cdot \sum_a^{H_2O}}{S_{\text{ф.б.}} \cdot \sum_a^{\Phi}} + (E - 1). \quad (23)$$

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования:

$$F = 0,5 \cdot \frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}} \cdot \frac{I_0 \cdot \left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)}{I_1 \cdot \left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)}. \quad (24)$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе (E-1):

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{зам}}}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{R_{\text{зам}}}{R_{\text{ф.б.}}}\right) - 0,75\right). \quad (25)$$

Затем рассчитывают коэффициент использования тепловых нейтронов по формуле:

$$\theta = \theta_{\phi.б.} \cdot \theta_0, \quad (26)$$

где  $\theta_0$  – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока.

$$\theta_0 = \frac{\sum_a^{mon}(\epsilon_2)}{\sum_a^\phi} = \frac{0,39}{0,391} = 0,997442. \quad (27)$$

Параметры необходимые для расчёта:

$$R_{\phi.б.} = 0,455 \text{ см};$$

$$R_{зам} = \sqrt{\frac{S_{яч}}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,408}{3,14}} = 0,67 \text{ см}.$$

С помощью усреднённых сечений по фиктивному блоку длина диффузии определяется таким образом:

$$L_{\phi.б.} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \sum_a^\phi \cdot \sum_{tr}^\phi}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,391 \cdot 0,707}} = 1,097 \text{ см};$$

$$L_{\phi.б.} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \sum_a^{H_2O} \cdot \sum_{tr}^{H_2O}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,021 \cdot 2,31}} = 2,555 \text{ см};$$

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left(\frac{0,67}{2,555}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{0,67}{0,455}\right) - 0,75\right) = -0,012;$$

$$F = 0,5 \cdot \frac{0,455}{1,097} \cdot \frac{I_0 \cdot \left(\frac{0,455}{1,097}\right)}{I_1 \cdot \left(\frac{0,455}{1,097}\right)} = 1,021;$$

$$\frac{1}{\theta_{\phi.б.}} = 1 + 1,021 \cdot \frac{0,758 \cdot 0,022}{0,67 \cdot 0,394} - 0,012 = 1,05;$$

$$\theta_{\phi.б.} = 0,95;$$

$$\theta = 0,95 \cdot 0,997442 = 0,947$$

### Расчет вероятности избежать резонансного захвата

В энергетических ядерных реакторах, как правило, применяются сборки

ТВЭЛОВ, которые состоят из нескольких блоков ядерного горючего. Для ячейки со стрержневыми блоками коэффициент  $\varphi$  рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{k_T \cdot R_U \cdot \sqrt{R_U \cdot \mu_1} + 0,73 \cdot R_U^2 \cdot \mu_1}{\xi \cdot \sum_{S_{зам}}^{H_2O} + \xi \cdot \sum_{S_{ф.б.}}^{\Phi}}\right) \quad (28)$$

где  $k_T$  – температурный коэффициент;

$\mu_1$  – пористость блока по U<sup>238</sup>;

$R_U$  – радиус уранового блока, см;

$\xi \cdot \sum_{S_{зам}}$  и  $\xi \cdot \sum_{S_{ф.б.}}$  – замедляющая способность замедлителя и фиктивного

блока соответственно.

Коэффициент  $k_T$  вычисляется по формуле:

$$k_T = 0,755 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_{мон}}). \quad (29)$$

При температуре  $T = 293\text{K}$  температурный коэффициент равен:

$$k_T = 0,755 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{293}) = 1,007.$$

$$\varphi = \exp\left(-\frac{1,007 \cdot 0,377 \cdot \sqrt{0,377 \cdot 0,453} + 0,73 \cdot 0,377^2 \cdot 0,453}{1,35 \cdot 0,758 + 0,016 \cdot 0,65}\right) = 0,72.$$

Подставив найденные значения коэффициентов и найдём коэффициент размножения для бесконечной среды:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta = 1,017 \cdot 0,72 \cdot 0,947 \cdot 1,911 = 1,326.$$

### 2.1.6. Оптимизация параметров ячейки

После расчета  $k_{\infty}$  необходимо подобрать такие параметры ячейки, при которых данный коэффициент будет максимальным. В некоторых диапазонах варьировались шаг расстановки ТВЭЛОВ и радиус топливного блока. Полученные зависимости изображены на рисунках.

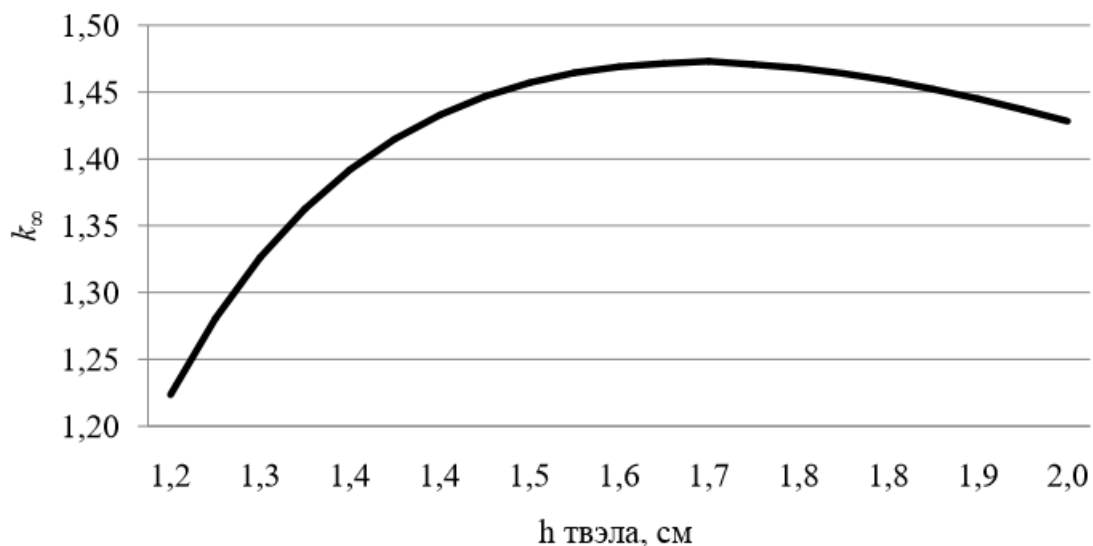


Рисунок 4 – Зависимость  $k_{\infty}$  от шага расстановки твэлов

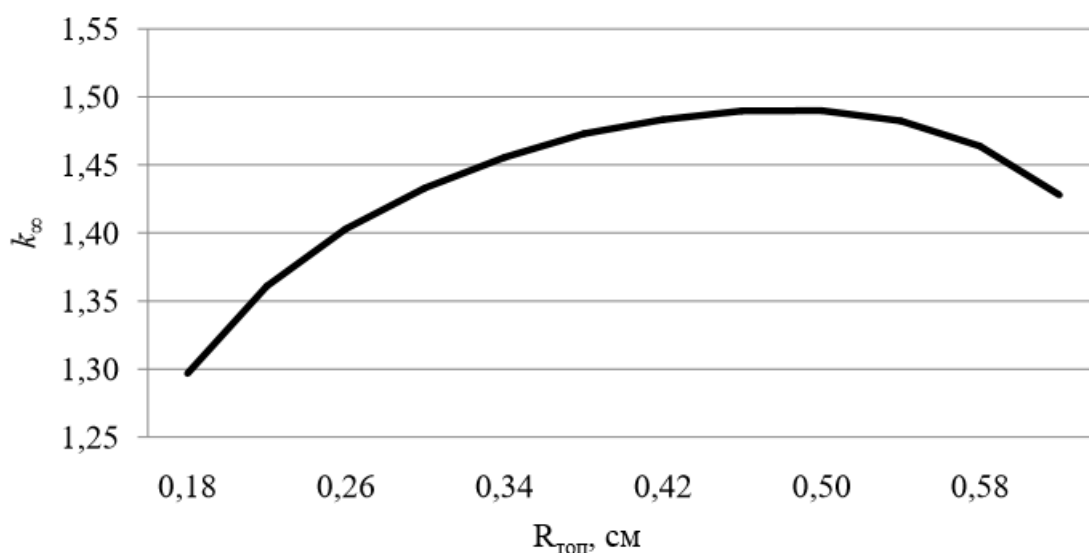


Рисунок 5 – Зависимость  $k_{\infty}$  от внешнего радиуса топливного блока

Зависимость на рисунке 4 объясняется не одним фактором. Начальное увеличение  $k_{\infty}$  связано с тем, что вероятность избежать резонансного захвата в «редких» решетках выше, чем в «тесных». Объем замедлителя в них больше, соответственно, нейтроны могут замедлиться до слабых резонансных или тепловых уровней, на которых вероятность захвата меньше. Уменьшение  $k_{\infty}$  связано с проявлением внешнего блок-эффекта. Кроме того, в «редких»

решетках значение коэффициента размножения быстрых нейтронов тоже меньше, чем в «тесных», так как быстрые нейтроны замедляются до подпороговых и не могут инициировать деление  $U^{238}$ . На рисунке 5 наблюдается проявление внутренних и внешних блок-эффектов, которые сильно влияют на коэффициент использования тепловых нейтронов. Уменьшение  $k_{\infty}$  на рисунке 5 объясняется усилением внутреннего блок-эффекта, потому что увеличивается значение плотности потока тепловых нейтронов на поверхности топливного блока.

После анализа полученных зависимостей было выбрано оптимальное значение  $k_{\infty}=1,49$ , при котором  $h_{яч}=1,65$  см,  $R_{\text{топ}}=0,49$  см.

### 2.1.7. Расчет эффективного коэффициента размножения ЯР

Эффективный коэффициент размножения вычисляется:

$$k_{эф} = \frac{k_{\infty} \cdot \exp(-B^2 \cdot \tau)}{1 + B^2 \cdot L^2} \quad (30)$$

где  $L^2$  – квадрат длины диффузии в решетке;  
 $\tau$  – возраст нейтронов в решётке;  
 $B^2$  – геометрический параметр.

Квадрат длины диффузии в решетке рассчитывается по формуле:

$$L^2 = L_{зам}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{ф.б.}^2 \cdot \theta = 2,555^2 \cdot (1 - 0,94757) + 1,097^2 \cdot 0,94757 = 1,481 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов в решетке оценивается по формуле:

$$\tau = \tau_{зам} \cdot \sqrt{\frac{S_{яч}}{S_{зам}}} = 27,3 \cdot \sqrt{\frac{1,408}{0,758}} = 25,36 \text{ см}^2.$$

Для реактора с отражателем необходимо учитывать эффективную добавку за счет отражателя ( $\delta$ ). Так, для цилиндрического реактора:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H_{a.з.} + 2\delta}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R_{a.з.} + \delta}\right)^2, \quad (31)$$

где  $\delta$  – эффективная добавка за счет отражателя, см.

Для ВВЭР с водным отражателем:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40), \text{ см,}$$

где  $M^2$  - площадь миграции в отражателе,  $\text{см}^2$ .

$$M^2 = \tau_{H_2O} + L_{H_2O}^2 = 27,3 + 2,555^2 = 33,829 \text{ см}^2;$$

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

Подставим полученные значения в формулу (31):

$$B^2 = \left( \frac{3,14}{356 + 2 \cdot 6,583} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{\frac{161,5}{2} + 6,583} \right)^2 = 0,000276 \text{ см}^{-2}.$$

Определим эффективный коэффициент размножения:

$$k_{\text{эф}} = \frac{1,326 \cdot \exp(-0,000276 \cdot 33,829)}{1 + 0,000276 \cdot 1,481} = 1,317$$

### 2.1.8 Расчет “горячего” состояния реактора

Эффективная температура нейтронного газа определяется по формуле:

$$T_{н.г.}^{\text{эфф}} = T_{\text{зам}} \cdot \left( 1 + 1,4 \cdot \frac{\overline{\sum a_{\text{яч}}}}{\xi \overline{\sum a_{\text{яч}}}} \right), \text{ [К]} \quad (32)$$

Макроскопические сечения поглощения и рассеяния учитываются при температуре замедлителя [10].

Микроскопические сечения, зависящие от температуры нейтронного газа, находятся следующим образом:

$$\overline{\sigma}_a(T_{н.г.}) = \sigma_{a_0} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot f_a(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{\text{сп}}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \text{ [барн];} \quad (33)$$

$$\overline{\sigma}_f(T_{н.г.}) = \sigma_{f_0} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot f_f(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{\text{сп}}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \text{ [барн],} \quad (34)$$

где  $f(T_{н.г.})$  – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение зависимости сечений от закона  $1/v$ ;

$F(\chi_{\text{сп}})$  – параметр зависящий от энергии сшивки.

Температура замедлителя определяется по формуле:

$$T_{зам} = \frac{t_{вх} + t_{вых}}{2} = \frac{298 + 330}{2} + 273 = 587 \text{ К.}$$

Далее по формулам (33) и (34) проводим уточнение сечений при температуре замедлителя.

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,886 \cdot 1,0071 \cdot \sqrt{\frac{293}{587}} = 1,07 \text{ барн;}$$

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,886 \cdot 0,9341 \cdot \sqrt{\frac{293}{587}} = 399,3 \text{ барн;}$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 583 \cdot 0,886 \cdot 0,9341 \cdot \sqrt{\frac{293}{587}} = 340,3 \text{ барн;}$$

$$\sigma_a^{Zr} = 1 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{587}} = 0,69 \text{ барн;}$$

$$\sigma_a^{Fe} = 2,53 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{587}} = 1,58 \text{ барн;}$$

$$\sigma_a^{Cr} = 3 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{587}} = 1,88 \text{ барн.}$$

Далее находим усредненные макроскопические сечения, с учетом долей материалов и пересчитанных микроскопических сечений.

С учетом долей материалов и пересчитанных сечений, усредненные сечения по ячейке равны:

$$\overline{\Sigma_{a_{яч}}} = 0,329 \text{ см}^{-1};$$

$$\overline{\xi \Sigma_{a_{яч}}} = 0,957 \text{ см}^{-1}.$$

Тогда температура нейтронного газа, определяемая по формуле (32), равна:

$$T_{н.г.}^{эфф} = 587 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{0,329}{0,957}\right) = 869,5 \text{ К.}$$

Далее находится отношение макроскопического сечения поглощения к замедляющей способности в точке пересечения спектров Ферми и Максвелла.

$$f_{zp}(\chi_{zp}) = \frac{\overline{\Sigma_{a_{яч}}}}{\xi \Sigma_{a_{яч}}} = \frac{0,329}{0,957} = 0,344.$$

Величина  $\chi_{zp} = E_{zp} / E_m$ , ( $E_m = kT_{н.г.}$ ) определяется графически или подбором из следующего трансцендентного уравнения:

$$f_{zp}(\chi_{zp}) = \frac{\chi_{zp}^2 \cdot e^{-\chi_{zp}}}{1 - (1 + \chi_{zp}) \cdot e^{-\chi_{zp}}} = \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s}. \quad (35)$$

$$\chi_{zp} = 3,55$$

$$F_{zp}(\chi_{zp}) = 1,13$$

Микроскопическое сечение взаимодействия при температуре нейтронного газа  $T_{н.г.}^{\text{эфф}} = 869,5$  К, ( $f_a(T_{н.г.}^{\text{эфф}}) = f_f(T_{н.г.}^{\text{эфф}}) = 0,9223$ ), с учетом  $F_{zp}(\chi_{zp}) = 1,13$ .

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,886 \cdot 0,91 \cdot \sqrt{\frac{293}{869,5}} \cdot 1,13 = 1,4 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,886 \cdot 0,9223 \cdot \sqrt{\frac{293}{869,5}} \cdot 1,13 = 357,83 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 583 \cdot 0,886 \cdot 0,91 \cdot \sqrt{\frac{293}{587}} = 301,37 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Zr} = 1 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{869,5}} \cdot 1,13 = 0,57 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Fe} = 2,53 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{869,5}} \cdot 1,13 = 1,44 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Cr} = 3 \cdot 0,886 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{869,5}} \cdot 1,13 = 1,7 \text{ барн}.$$

Усредненные макросечения взаимодействия равны:

$$\overline{\Sigma_{a_{яч}}} = 0,299 \text{ см}^{-1};$$

$$\overline{\xi \Sigma_{a_{яч}}} = 0,958 \text{ см}^{-1}.$$



Далее находится отношение макроскопического сечения поглощения к замедляющей способности в точке пересечения спектров Ферми и Максвелла.

$$f_{zp}(\chi_{zp}) = \frac{\overline{\sum_{a_{яч}}}}{\xi \sum_{a_{яч}}} = \frac{0,299}{0,958} = 0,312.$$

Найденной величине  $f_{zp}(\chi_{zp})$  соответствует  $\chi_{zp} = 3,55$ . Так как найденное значение  $\chi_{zp} = 3,55$  практически полностью совпадает с полученным ранее значением, то нет необходимости проведения перерасчета сечений.

При данных сечениях коэффициент размножения будет равен:

$$\mu = 1,017;$$

$$\varphi = 0,72;$$

$$\theta = 0,928;$$

$$\eta = 1,874;$$

$$k_{\infty} = 1,273.$$

Коэффициент эффективного для «горячего» состояния реактора определяется аналогично (30).

Для нахождения квадрата длины диффузии  $L_{гор}^2$  необходимо пересчитать  $L_{зам}^2$ , умножив значение для «холодного» состояния реактора на соответствующую температурную поправку:

$$L_{зам}^2(T) = L_{зам}^2(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0,48} \quad (36)$$

где  $T_0$  – температура для «холодного» состояния реактора;

$T$  – средняя температура замедлителя;

$L_{зам}^2(T_0)$  – квадрат длины диффузии в замедлителе для «холодного» состояния реактора.

Тогда:

$$L_{зам}^2(T) = 2,555^2 \cdot \left(\frac{587}{293}\right)^{0,48} = 3,019 \text{ см}^2.$$

Длина диффузии для решетки «горячего» состояния реактора находится так же, как и для «холодного» состояния реактора:

$$L_p^2 = L_{зам}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{ф.б.}^2 \cdot \theta = 3,019^2 \cdot (1 - 0,928) + 1,401^2 \cdot 0,928 = 2,478 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов в замедлителе для «горячего» состояния реактора пересчитывается по формуле:

$$\tau_{зам(гор)} = \frac{\tau_{зам(хол)}}{\rho_{H_2O} \cdot \frac{S_{H_2O}}{S_{яч.}} \cdot \left[1 - \frac{S_{H_2O}}{S_{яч.}} \cdot (1 - \rho_{H_2O})\right]^{3/2}}, \text{ см}^2, \quad (37)$$

где  $\tau_{зам(хол)}$  – возраст нейтронов в «холодном» состоянии реактора.

Подставив значения соответствующих параметров:

$$\tau_{зам(гор)} = \frac{27,3}{0,697 \cdot \frac{0,758}{1,408} \cdot \left[1 - \frac{0,758}{1,408} \cdot (1 - 0,697)\right]^{3/2}} = 95,112 \text{ см}^2.$$

Далее находим эффективный коэффициент по формуле (30), подставляя полученные значения, пересчитанные для «горячего» состояния реактора, учитывая, что геометрический параметр остался без изменений:

$$k_{эф} = \frac{1,273 \cdot \exp(-0,000276 \cdot 95,112)}{1 + 0,000276 \cdot 2,478} = 1,241$$

## 2.2 Многогрупповой расчет

Многогрупповая система уравнений диффузии для критического ядерного реактора (стационарная задача) имеет вид [11, 12]:

$$D^{(i)}\Delta\Phi^{(i)} - \Sigma_a^{(i)}\Phi^{(i)} - \sum_{k=i+1}^{26} \Sigma_R^{i \rightarrow k} \Phi^{(i)} + \sum_{k=1}^{i-1} \Sigma_R^{k \rightarrow i} \Phi^{(k)} + \varepsilon^{(i)} \sum_{k=1}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi^{(k)} = 0 \quad (38)$$

где  $i$  – номер группы, для которой записано уравнение;  $k$  – номер группы;  $D^{(i)}$  – коэффициент диффузии нейтронов  $i$ -ой группы;  $\Phi^{(i)}, \Phi^{(k)}$  – плотности потоков нейтронов в соответствующих группах;  $\Sigma_a^{(i)}$  – макроскопическое сечение поглощения нейтронов  $i$ -ой группы;  $\Sigma_R^{i \rightarrow k}, \Sigma_R^{k \rightarrow i}$  – макроскопическое сечение перехода нейтронов из  $i$ -ой в ниже лежащую  $k$ -ую (из выше лежащей  $k$ -ой в рассматриваемую  $i$ -ую) группу, соответственно;  $\varepsilon^{(i)}$  – вероятность для нейтрона деления попасть непосредственно в  $i$ -ую группу;  $\nu_f^{(k)}$  – среднее число нейтронов на акт деления;  $\Sigma_f^{(k)}$  – макроскопическое сечение деления для нейтронов  $k$ -ой группы.

Согласно уравнению критического реактора в диффузионно-возрастном приближении первое слагаемое в уравнении (38), описывающее утечку нейтронов из активной зоны, будет определяться по соотношению:

$$D^{(i)}\Delta\Phi^{(i)} = -D^{(i)}B^2\Phi^{(i)} \quad (39)$$

где  $B^2$  – геометрический параметр.

Для организации итерационного процесса при решении системы уравнений в рассматриваемой задаче необходимо составить систему уравнений для определения плотностей потоков нейтронов следующего вида:

$$\Phi_j^{(i)} = f(\Phi_{j-1}^{(1)}, \Phi_{j-1}^{(2)}, \dots, \Phi_{j-1}^{(k)}, \dots, \Phi_{j-1}^{(26)}), \text{ при } k \neq i,$$

где  $j$  – номер итерации, начиная с первой.

С этой целью систему многогрупповых уравнений диффузии с учетом соотношения (39) необходимо привести к виду:

$$-D^{(i)}B^2\Phi^{(i)} - \Sigma_a^{(i)}\Phi^{(i)} - \sum_{k=i+1}^{26} \Sigma_R^{i \rightarrow k} \Phi^{(i)} + \sum_{k=1}^{i-1} \Sigma_R^{k \rightarrow i} \Phi^{(k)} + \varepsilon^{(i)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi^{(k)} + \varepsilon^{(i)} \nu_f^{(i)} \Sigma_f^{(i)} \Phi^{(i)} = 0$$

Выражая значение плотности потока в  $i$ -ой группе получим:

$$\Phi_j^{(i)} = \frac{\varepsilon^{(i)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi_{j-1}^{(k)} + \sum_{k=1}^{i-1} \Sigma_R^{k \rightarrow i} \Phi_j^{(k)}}{D^{(i)}B^2 + \Sigma_a^{(i)} + \sum_{k=i+1}^{26} \Sigma_R^{i \rightarrow k} - \varepsilon^{(i)} \nu_f^{(i)} \Sigma_f^{(i)}}$$

Система уравнений преобразуется к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_j^{(1)} = \frac{\varepsilon^{(1)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi_{j-1}^{(k)}}{D^{(1)}B^2 + \Sigma_a^{(1)} + \sum_{k=2}^{26} \Sigma_R^{1 \rightarrow k} - \varepsilon^{(1)} \nu_f^{(1)} \Sigma_f^{(1)}}; \\ \Phi_j^{(2)} = \frac{\varepsilon^{(2)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi_{j-1}^{(k)} + \Sigma_R^{1 \rightarrow 2} \Phi_j^{(1)}}{D^{(2)}B^2 + \Sigma_a^{(2)} + \sum_{k=3}^{26} \Sigma_R^{2 \rightarrow k} - \varepsilon^{(2)} \nu_f^{(2)} \Sigma_f^{(2)}}; \\ \Phi_j^{(3)} = \frac{\varepsilon^{(3)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi_{j-1}^{(k)} + \Sigma_R^{1 \rightarrow 3} \Phi_j^{(1)} + \Sigma_R^{2 \rightarrow 3} \Phi_j^{(2)}}{D^{(3)}B^2 + \Sigma_a^{(3)} + \sum_{k=4}^{26} \Sigma_R^{3 \rightarrow k} - \varepsilon^{(3)} \nu_f^{(3)} \Sigma_f^{(3)}}; \\ \dots \\ \Phi_j^{(25)} = \frac{\sum_{k=1}^{24} \Sigma_R^{k \rightarrow 25} \Phi_j^{(k)}}{D^{(25)}B^2 + \Sigma_a^{(25)} + \Sigma_R^{25 \rightarrow 26}}; \\ \Phi_j^{(26)} = \frac{\sum_{k=1}^{25} \Sigma_R^{k \rightarrow 26} \Phi_j^{(k)}}{D^{(26)}B^2 + \Sigma_a^{(26)}}. \end{array} \right.$$

В представленной системе уравнений известны все параметры за исключением плотностей потоков на предыдущей итерации  $\Phi_{j-1}^{(k)}$ , а,

следовательно, и  $\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi_{j-1}^{(k)}$ . Данная сумма определяет число нейтронов,

образующихся во втором поколении при делении ядер всеми нейтронами первого поколения, кроме нейтронов  $i$ -ой группы.

Для начала итерационного процесса на нулевой итерации плотность потока нейтронов в  $i$ -ой группе определялась из соотношения (38) с учетом (39) по следующему соотношению:

$$\Phi_0^{(i)} = \frac{\varepsilon^{(i)} \sum_{k=1}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi_0^{(k)} + \sum_{k=1}^{i-1} \Sigma_R^{k \rightarrow i} \Phi_0^{(k)}}{D^{(i)} B^2 + \Sigma_a^{(i)} + \sum_{k=i+1}^{26} \Sigma_R^{i \rightarrow k}},$$

где число нейтронов, образующихся во втором поколении при делении ядер всеми нейтронами первого поколения, задавалось равным единице (

$$\sum_{k=1}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi^{(k)} = 1).$$

### 2.2.1 Расчет многогрупповых констант

Для начала многогруппового расчета были взяты начальные параметры, а также были рассчитаны гомогенные концентрации все элементов такие же как при одногрупповом расчете с учетом поправки на температуру. Данные гомогенизированных концентраций представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Концентрация гомогенизированных элементов

Элемент	Концентрация, см <sup>-3</sup>
UO <sub>2</sub>	6,952·10 <sup>21</sup>
U <sup>238</sup>	6,619·10 <sup>21</sup>
U <sup>235</sup>	3,337·10 <sup>20</sup>
O (в топ)	1,390·10 <sup>22</sup>
H <sub>2</sub> O	1,254·10 <sup>22</sup>
H	2,509·10 <sup>22</sup>
O (в тепл)	1,254·10 <sup>22</sup>

Zr	$5,278 \cdot 10^{21}$
Sn	$7,917 \cdot 10^{19}$
Fe	$1,056 \cdot 10^{19}$
Cr	$1,188 \cdot 10^{17}$
O <sub>(в к.м.)</sub>	$7,917 \cdot 10^{18}$
He	$1,893 \cdot 10^{17}$
O <sub>(сумм)</sub>	$2,646 \cdot 10^{22}$

### 2.2.1.1 Подготовка групповых констант с учетом самоэкранировки

Для точности расчетов необходимо учесть резонансную самоэкранировку ( $f$ ) материала и от  $\sigma_0^l(i)$ . Самоэкранировка подразумевает, что микроскопическое сечение отдельного элемента внутри группы зависит от величины макроскопического сечения других элементов в этой группе.

Формула по которой рассчитывается  $\sigma_0^l(i)$  выглядит следующим образом:

$$\sigma_0^l(i) = \frac{\sum_{m \neq l} \sigma_{t,m}^l \cdot N_m}{N_l}, \quad (40)$$

где  $l$  – элемент для которого рассчитывается поправка;

$i$  – номер энергетической группы нейтронов;

$m$  – остальные элементы активной зоны;

$\sigma_{t,m}^l$  – полное микроскопическое сечение взаимодействия элемента  $m$ ,  $t$  – ой группы;

$N_l, N_m$  – концентрации элементов  $l$  и  $m$  соответственно.

Значения микроскопических сечений элементов, рассчитанных по формуле (40), и коэффициенты  $f$  приведены в Приложении В.

После определения  $\sigma_0^l(i)$  отыскиваем поправки к сечениям ( $f$ ). С учетом поправок находим микроскопические сечения:

$$\sigma_c = \sigma_{a_{\text{мабл.}}} \cdot f_c \quad (41)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f_{табл.}} \cdot f_f \quad (42)$$

где  $\sigma_{i_{табл.}}$  – табличные значения сечений;

$f$  – поправочный коэффициент резонансной самоэкранировки.

Так же пересчитываются микроскопические сечения деления и поглощения для тепловой группы, по следующим формулам:

$$\sigma_a(T_{н.г.}) = \sigma_{a_{табл.}} \cdot 0,886 \cdot g_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}} \quad (43)$$

$$\sigma_f(T_{н.г.}) = \sigma_{f_{табл.}} \cdot 0,886 \cdot g_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}} \quad (44)$$

Далее находится температура нейтронного газа по следующей формуле:

$$T_{н.г.} = T_{зам} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{\sum_{a_{зам}}(T)}{\xi \sum_{s_{зам}}}\right), \text{ [K]} \quad (45)$$

где  $T_{зам}$  – температура замедлителя;

$\sum_{a_{зам}}(T)$  – макроскопическое сечение поглощения для замедлителя в тепловой группе;

$\xi \sum_{s_{зам}}$  – замедляющая способность для замедлителя в тепловой группе.

$T_{н.г.}$  подставляется формулы (43) и (44), далее пересчитывается заново [13].

В приложении Г приведены микроскопические табличные сечения всех элементов, с учетом самоэкранировки.

### 2.2.1.2 Подготовка констант

Далее проводится подготовку констант. Для начала осуществляется переход  $\sum_R^{i \rightarrow k}$ , [см<sup>-1</sup>] [14].

Для этого производится свертка «переворачивание»  $\sigma_{in}$ , далее выписывается  $\sigma_e$ , для каждой группы (затем суммируется  $\sigma_{in} + \sigma_e$ , и далее находится  $\sum_R^{i \rightarrow k}$ .

$$\sum_R = (\sigma_{in} + \sigma_e) \cdot N, \quad (46)$$

где  $N$  – гомогенная ядерная концентрация элемента;

$\sigma_{in}$  – микроскопическое сечение неупругого рассеяния;

$\sigma_e$  – микроскопическое сечение замедления.

Пересчитываются  $\sigma_a$  для каждого элемента:

$$\sigma_a = \sigma_c + \sigma_f \quad (47)$$

Находится транспортное макроскопическое сечение  $\sigma_{tr}$ :

$$\sigma_{tr} = \sigma_a + \sigma_{in} + \sigma_e \cdot (1 - \mu_e), \quad (48)$$

где  $\sigma_c$  – микроскопическое сечение радиационного захвата;

$\sigma_{in}$  – микроскопическое сечение неупругого рассеяния;

$\sigma_e$  – микроскопическое сечение упругого рассеяния;

$\mu_e$  – средний косинус угла рассеяния при упругом рассеянии.

Находится транспортное макроскопическое сечение  $\Sigma_{tr}$ :

$$\Sigma_{tr} = N_i (\sigma_a + \sigma_{in} + \sigma_e \cdot (1 - \mu_e))$$

Рассчитываются макроскопические сечения:

$$\Sigma_i = N \cdot \sigma_i, \quad (49)$$

где  $\sigma_i$  – микроскопическое сечение элемента  $i$ .

Далее находится коэффициент диффузии:

$$D = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}}. \quad (50)$$

В приложении Ж приведены все многогрупповые константы.

### 2.2.2 Расчет эффективный коэффициент размножения

Для нахождения эффективный коэффициент размножения необходимо определить геометрический параметр. Геометрический параметр определяется по следующей формуле:



$$B^2 = \left( \frac{3,14}{H_{A.3.} + 2 \cdot \frac{0,7104}{\Sigma_{tr}}} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{\frac{D_{A.3.}}{2} + \frac{0,7104}{\Sigma_{tr}}} \right). \quad (51)$$

Эффективный коэффициент размножения определяется по следующей формуле:

$$k_{эф} = \frac{\overline{v_f \cdot \Sigma_f}}{D \cdot B^2 + \overline{\Sigma_a}} = \frac{0,028}{0,0003 + 0,023} = 1,239. \quad (52)$$

Все величины в данной формуле являются усредненными по спектру нейтронов.

### 2.2.3 Определение длительности кампании и нуклидного состава ядерного топлива

Изменение нуклидного состава в ходе работы ядерного реактора определяется с помощью конечно-разностной схемы:

$$\Delta N_n = -\overline{\sigma_a^n} \cdot N_n \cdot \overline{\Phi} \cdot \Delta t, \quad (53)$$

где  $\overline{\sigma}$  – усредненные по спектру сечения;

$N_n$  – стартовая концентрация нуклида;

$\overline{\Phi}$  – среднее значение плотности потока по активной зоне;

$\Delta t$  – единичный временной интервал.

Эта конечно-разностная схема представляет из себя решение систем дифференциальных уравнений, а именно для  $U^{235}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_{U^{235}}}{dt} = -\bar{\sigma}_a^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}} \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_{U^{238}}}{dt} = -\bar{\sigma}_a^{U^{238}} \cdot N_{U^{238}} \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_{Pu^{239}}}{dt} = \bar{\sigma}_a^{U^{238}} \cdot N_{U^{238}} \cdot \bar{\Phi} + -\bar{\sigma}_a^{Pu^{239}} \cdot N_{Pu^{239}} \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_{Pu^{240}}}{dt} = \bar{\sigma}_a^{Pu^{239}} \cdot N_{Pu^{239}} \cdot \bar{\Phi} + (-\bar{\sigma}_a^{Pu^{240}} \cdot N_{Pu^{240}} \cdot \bar{\Phi}); \\ \frac{dN_{Pu^{241}}}{dt} = \bar{\sigma}_a^{Pu^{240}} \cdot N_{Pu^{240}} \cdot \bar{\Phi} + (-\bar{\sigma}_a^{Pu^{241}} \cdot N_{Pu^{241}} \cdot \bar{\Phi}); \\ \frac{dN_{Pu^{242}}}{dt} = \bar{\sigma}_a^{Pu^{241}} \cdot N_{Pu^{241}} \cdot \bar{\Phi} + (-\bar{\sigma}_a^{Pu^{242}} \cdot N_{Pu^{242}} \cdot \bar{\Phi}); \\ \frac{dN_{\text{ИДУ}^{235}}}{dt} = 2 \cdot \bar{\sigma}_f^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}} \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_{\text{ИДР}^{239}}}{dt} = 2 \cdot \bar{\sigma}_f^{Pu^{239}} \cdot N_{Pu^{239}} \cdot \bar{\Phi}. \end{array} \right.$$

Изменение нуклидного состава измеряется через каждые 50 эффективных суток. Данный процесс происходит до тех пор, пока  $k_\infty$  не станет меньше единицы.

В данной работе длительность кампании ядерного топлива составила 400 эффективных суток. Для данного реактора, который рассчитывается в работе, минимальная кампания ядерного топлива составляет около 800 суток. Такая большая погрешность обусловлена тем, что при многогрупповом расчете не учитывались поправки самоэкранировки в резонансной области для Pu 239-242.

### 2.3 Расчёт в программе WIMS-D5

Программа WIMS-D5 предназначена для нейтронно-физического расчета ячеек ядерных реакторов различного типа (включая расчет выгорания) [15].

Расчет в программе WIMS-D5 проводился с целью сравнения результатов, полученных при одногрупповом и многогрупповом методе расчета. Исходные размеры для элементарной ячейки, были взяты те, которые были выбраны такие

же как при других методах расчета, а концентрации выбраны те, которые получены при многогрупповом расчете. Код программы представлен в приложении 3.

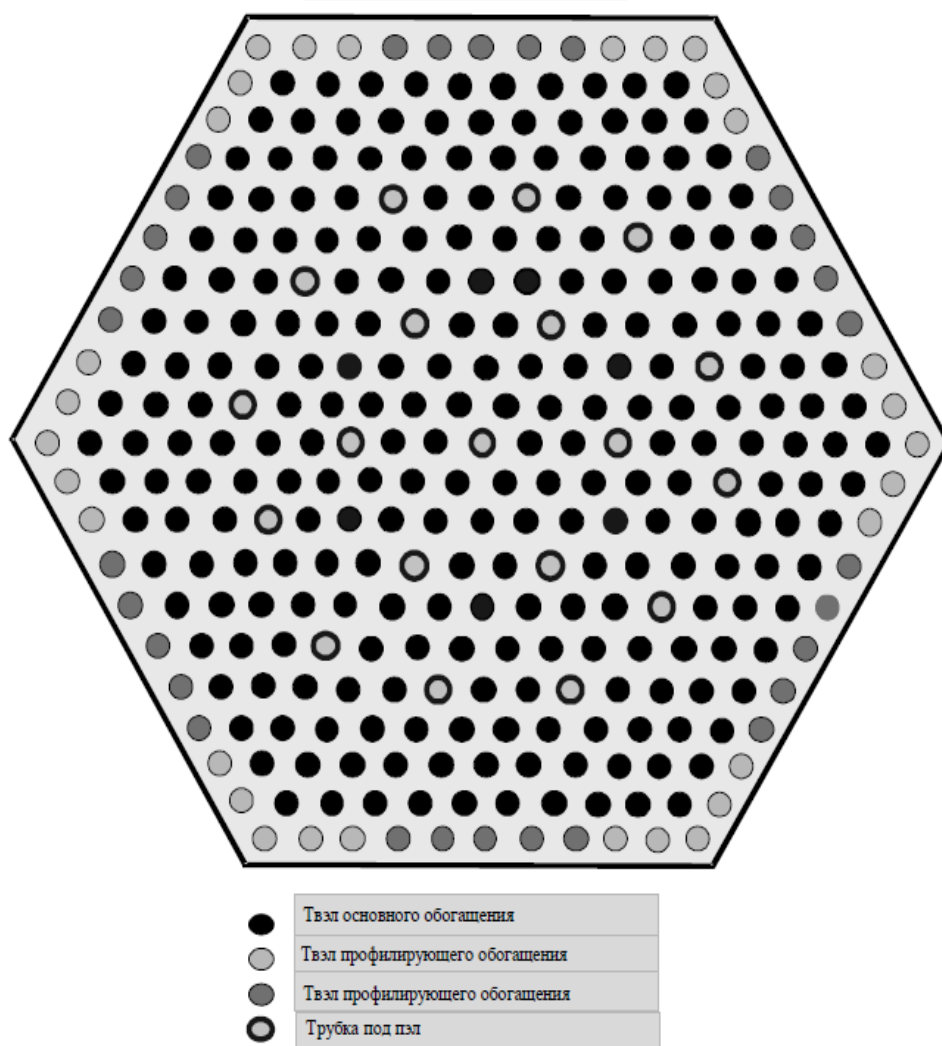


Рисунок 6 – Схема расположения твэлов в реакторе ВВЭР-1000

Расчетная модель представляет собой бесконечную по высоте элементарную ячейку водо-водяного реактора, состоящую из твэла и окружающего его водяного теплоносителя. Такой состав элементарной ячейки выбран из условия сохранения баланса материалов в реакторе и в его расчетной модели.

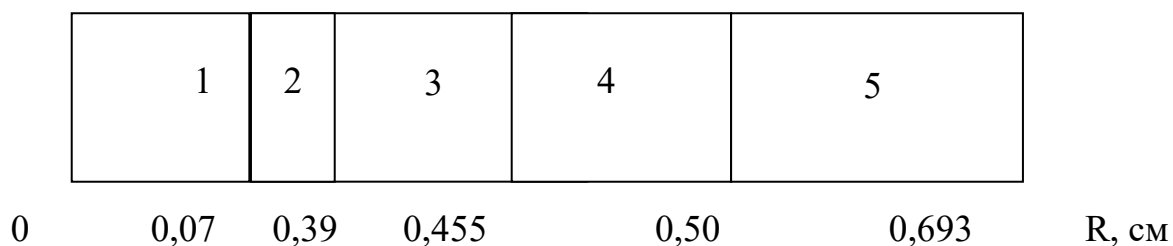


Рисунок 7 – Позонное деление элементарной ячейки

Реальная шестигранная ячейка при расчете заменяется на цилиндрическую, площадь поперечного сечения которой равна площади реальной ячейки. Сердечник твэла (зона 2) внешним радиусом 0,39 см имеет внутреннее отверстие диаметром 0,07 см (зона 1). Зона 3 описывает оболочку твэла, зоны 4 и 5 представляют водяной теплоноситель (и замедлитель).

### 2.3.1 Расчет коэффициент размножения и длительности кампании

Так как в программе не учитывается вероятность избежать утечки, а следовательно считается только  $k_{\infty}$ . То для точного определения длительности кампании необходимо определить  $k_{эф}$ . Для этого примем вероятность утечки, полученную при одноклассовом расчете.

$$k_{эф} = \frac{k_{\infty} \cdot \exp(-B^2 \cdot \tau)}{1 + B^2 \cdot L^2} \quad (54)$$

В результате расчета элементарной ячейки реактора по программе WIMS – D5 на первом этапе была получено значение  $k_{\infty} = 1,39$ .

Тогда  $k_{эф}$  равен:

$$k_{эф} = \frac{1,39 \cdot \exp(-0,000276 \cdot 33,829)}{1 + 0,000276 \cdot 1,481} = 1,38$$

Выгорание топлива влияет на размножающие свойства активной зоны, меняются спектры нейтронов, а также нуклидный состав топлива. Исследуем данные зависимости.

Для расчета в программе WIMS-D5 необходимо было определить удельную мощность в топливе. При тепловой мощности реактора 3200 МВт

мощность среднего твэла равна 0,059 МВт. При массе урана в нем – 1511 г с 1 т урана снимается средняя мощность 39 МВт/т..

Резкий спад в начале кампании обусловлен появлением отравителей

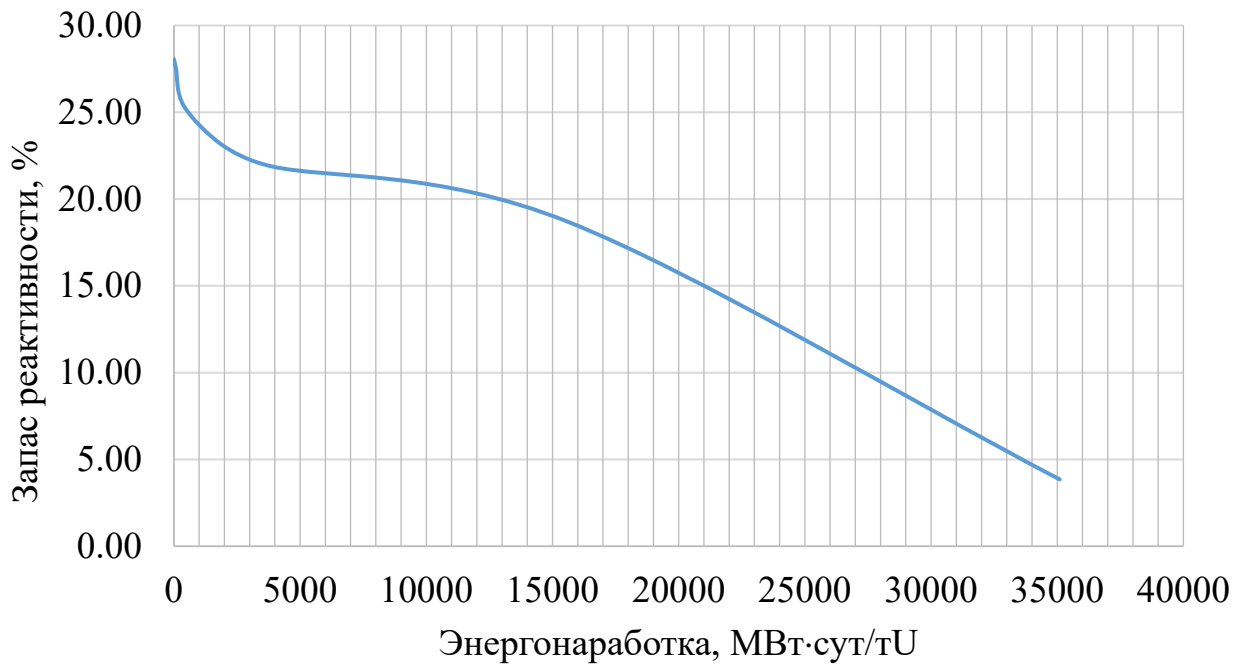


Рисунок 8 – Кривая энерговыработки заданного реактора

Резкий спад в начале кампании обусловлен появлением отравителями Хе и Sm.

По результатам расчета получили, что при  $k_{\infty} = 1,04$  длительность кампании составит примерно  $t = 900$  сут, а энергонаработка (глубина выгорания) составит  $Q = 35100 \frac{МВт \cdot сут}{mU}$ .

В таблице 7 представлены изменения в концентрациях некоторых элементов с течением времени.

Таблица 7 – Зависимость концентраций ядер от выгорания

Энергонаработка, МВт·сут/тU	Концентрация ядер $10^{20}$ , 1/см <sup>3</sup>				
	U-235	U-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241
0	9.2	198.6	0	0	0
78	9.18	198.6	0.000584	0	0

Продолжение таблицы 7.					
390	9.1	198.6	0.0023	0.000023	0
1950	8.71	198.5	0.0118	0.00361	0.000239
3900	8.25	198.3	0.0295	0.0135	0.000183
15600	5.82	197.0	0.118	0.0230	0.00573
35100	2.83	194.6	0.131	0.0366	0.021

Изменение концентрации  $^{235}\text{U}$  представлена на рисунке 8.

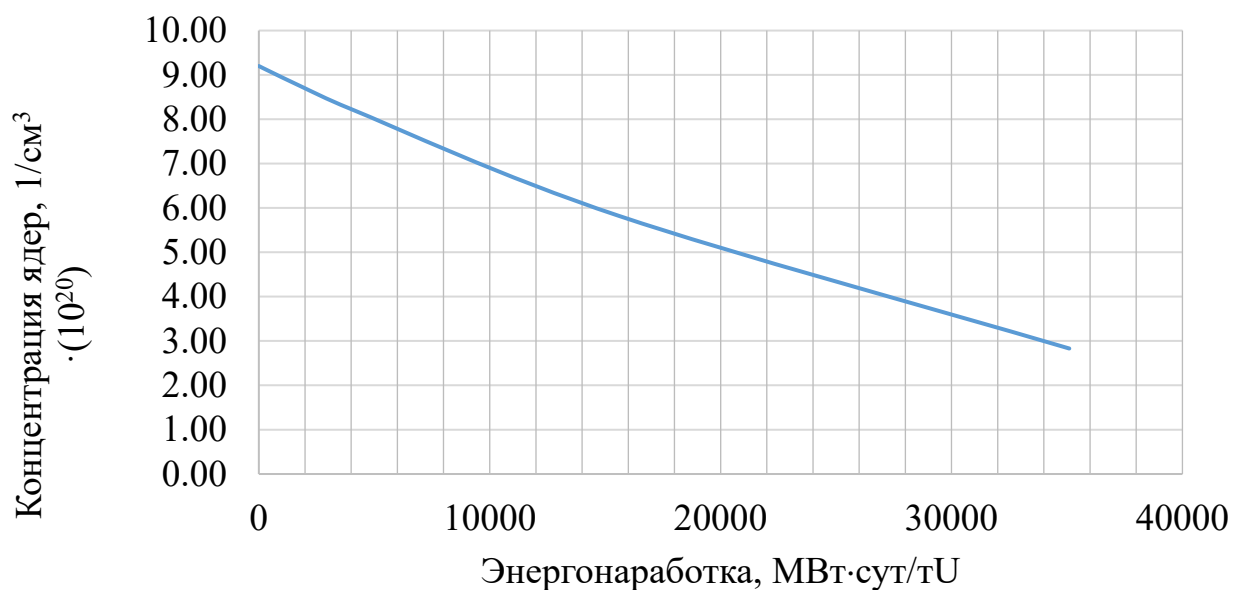


Рисунок 8 – Изменение  $^{235}\text{U}$  в процессе выгорания

Динамика накопления изотопов плутония по мере выгорания топлива представлена на рисунке 9.

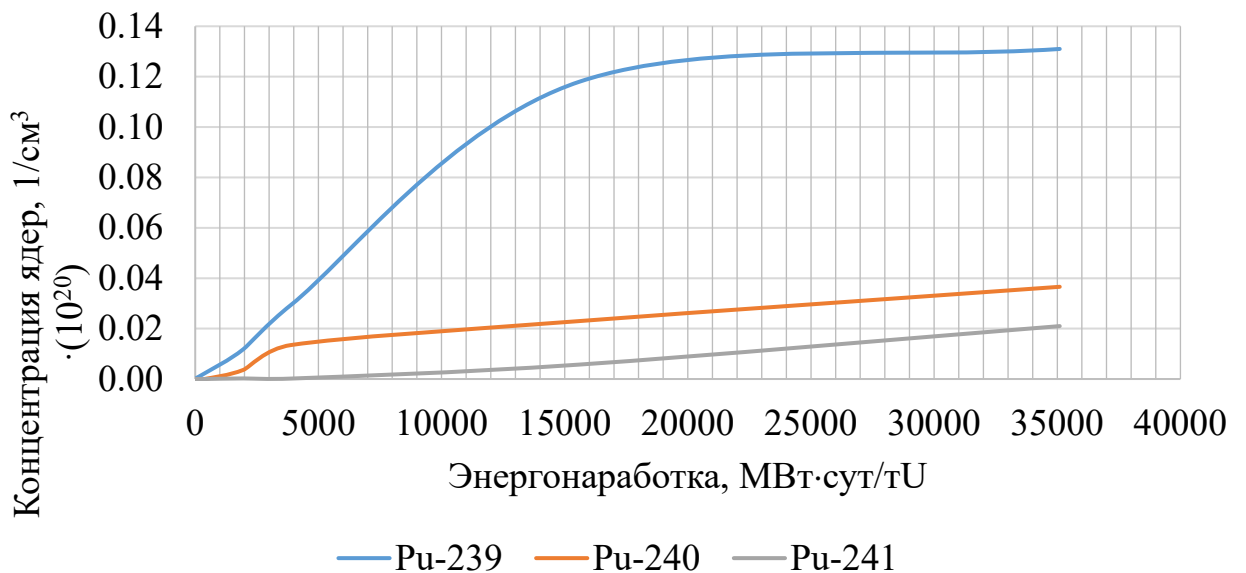


Рисунок 9 – Динамика накопления изотопов плутония при выгорании топлива

Чтобы понять, как реактор ведёт себя при разогреве, произведен расчёт при рабочей температуре. Для этого были определены следующие температуры: температура топлива – 1000 К, температура оболочки, теплоносителя и замедлителя – 600 К.

По результатам расчета получено значение  $k_{\infty} = 1,307$ , а  $k_{эф} = 1,294$ . Так же длительность кампании составит примерно  $t = 890$  сут, а энергонаработка (глубина выгорания) составит  $Q = 34710 \frac{МВт \cdot сут}{тU}$ .

### 2.3.2 Определение потери реактивности при отравлении

Отравлением называется изменение реактивности вследствие поглощения нейтронов короткоживущими ядрами. Важнейшим из отравляющих продуктов является  $\text{Xe}^{135}$ , имеющий очень большое сечение поглощения ( $\sigma_{\text{Xe}} = 2,75 \cdot 10^6$  барн). После  $\text{Xe}^{135}$  наиболее сильным из вредных поглотителей нейтронов является изотоп  $\text{Sm}^{149}$ . Самарий обладает большим сечением поглощения, достигающим значения  $\sigma_{\text{Sm}} = 59200$  барн.

Чтобы определить потери реактивности нужно узнать равновесные

концентрации йода, ксенона, прометия, самария, полагая, что ядерный реактор после пуска был мгновенно выведен на номинальную мощность (средняя плотность потока тепловых нейтронов по реактору  $\Phi = 3,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , взята из программы WIMS-D5 ) :

$$N_{I_0} = \frac{\omega_I}{\lambda_I} \cdot \sum_f^{U^{235}} \cdot \Phi, \quad (55)$$

$$N_{Xe_0} = \frac{(\omega_I + \omega_{Xe})}{\lambda_{Xe} + (\sigma_a^{Xe} \cdot \Phi_0)} \cdot \sum_f^{U^{235}} \cdot \Phi, \quad (56)$$

$$N_{Pm_0} = \frac{\omega_{Pm}}{\lambda_{Pm}} \cdot \sum_f^{U^{235}} \cdot \Phi, \quad (57)$$

$$N_{Sm_0} = \frac{\omega_{Pm}}{\sigma_a^{Sm}} \cdot \sum_f^{U^{235}}, \quad (58)$$

где  $\omega_i$  – вероятность появления  $i$ -ого элемента из  $U^{235}$ ;

$\sum_f^{U^{235}}$  – макроскопическое сечение деления  $U^{235}$ ,  $\text{см}^{-1}$ ;

$\lambda_i$  – постоянная распада  $i$ -ого элемента,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\sigma_a$  – микроскопическое сечение поглощения, барн.



Таблица 8 – Константы для расчета отравления

$\sum_1^{U^{235}} , \text{см}^{-1}$	0,101
$\sum_1^{mon} , \text{см}^{-1}$	0,135
$\omega_I , \%$	5,6
$\omega_{Xe} , \%$	0,3
$\omega_{Pm} , \%$	1,3
$\lambda_I , \text{с}$	$2,870 \cdot 10^{-5}$
$\lambda_{Xe} , \text{с}$	$2,093 \cdot 10^{-5}$
$\lambda_{Pm} , \text{с}$	$4,097 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_a^{Xe} , \text{барн}$	$2,750 \cdot 10^6$
$\sigma_a^{Sm} , \text{барн}$	$5,920 \cdot 10^4$

Далее считаем равновесные концентрации:

$$N_{I_0} = \frac{0,056}{2,87 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,101 \cdot 3,4 \cdot 10^{13} = 6,7 \cdot 10^{15} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Xe_0} = \frac{(0,056 + 0,004)}{2,11 \cdot 10^{-5} + (2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 3,4 \cdot 10^{13})} \cdot 0,101 \cdot 3,4 \cdot 10^{13} = 1,8 \cdot 10^{15} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Pm_0} = \frac{0,013}{3,85 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,101 \cdot 3,4 \cdot 10^{13} = 1,16 \cdot 10^{16} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Sm_0} = \frac{0,013}{5,92 \cdot 10^{-20}} \cdot 0,101 = 2,22 \cdot 10^{16} \text{ ядер/см}^3.$$

Определим потери реактивности при отравлении Xe и Sm в любой момент времени до установления стационарного значения:

$$p_{Xe}(t) = p_{Xe}^0 \cdot (0,4 \cdot e^{-0,0001t} + (1-1,4 \cdot e^{-0,000029t}));$$

$$p_{Xe}^0 = -\theta \cdot \frac{(\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \sum_f^{U^{235}} \cdot \Phi \cdot \sigma_a^{Xe}}{\lambda_{Xe} + (\sigma_a^{Xe} \cdot \Phi) \cdot \sum_a^{mon}} =$$

$$-0,947 \frac{(0,056 + 0,003) \cdot 0,101 \cdot 3,4 \cdot 10^{13} \cdot 2,75 \cdot 10^{-18}}{2,11 \cdot 10^{-5} + (2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 3,4 \cdot 10^{13}) \cdot 0,135} = -0,0335$$

$$p_{Sm}(t) = p_{Sm}^0 \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{Pm} \cdot e^{-\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot t}}{\lambda_{Pm} - \sigma_a^{Sm} \cdot \Phi} + \frac{\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot e^{\lambda_{Pm} \cdot t}}{\lambda_{Pm} - \sigma_a^{Sm} \cdot \Phi}\right);$$

$$p_{Sm}^0 = \theta \cdot \frac{\omega_{Pm} \cdot \sum_f^{U^{235}}}{\sum_a^{mon}} = -0,947 \cdot \frac{0,013 \cdot 0,101}{0,135} = -0,0091.$$

## 2.4 Сравнение результатов расчета

Сравнение происходит для того чтобы определить эффективность и целесообразность использование программы WIMS-D5 в сравнении с другими методами расчета.

Таблица 9 – Данные по расчетам разных методов

Метод расчета	Одногрупповой (холодное/горячее состояние)		Многогрупповой (холодное/горячее состояние)		WIMS-D5 (холодное/горячее состояние)	
	$k_\infty$	1,326	1,273	–		1,39
$k_{эф}$	1,317	1,249	1,281	1,239	1,38	1,294
Длит. камп.	–		400		900	
Отклонение относительно WIMS-D5B, %	4,6	2,6	7,2	4,3	–	
	4,57	4,1				

Перерасчет в программе WIMS-5D, который показал относительно близкие значения, с предыдущими расчетами. Это означает, что предыдущие расчеты были проведены верно. Расхождение в значениях составила только длительность кампании топлива. В программе кампания топлива составила 900 эфф. суток, что соответствует реактору ВВЭР-1000.

Как можно видеть программа WIMS-5D точна и эффективна из-за того, что тратит меньше время на расчеты относительно других методов, а результаты довольно близки к истенным.

### **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.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести SWOT-анализ;
- провести планирование научно-исследовательской работы;
- произвести расчёт бюджета научно-исследовательской работы;
- определить ресурсную эффективность 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 10.

Таблица 10 – 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 – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 20% И – 100%
Выбор исходных параметров	НР, И	НР – 100% И – 70%
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 – 60% И – 100%

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.

$$t_{ОЖ} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5} \quad (59)$$

$$t_{ОЖ} = \frac{t_{\min} + 4t_{\text{prob}} + t_{\max}}{6} \quad (60)$$

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

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

$t_{\text{prob}}$  – 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 8 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:

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{\text{ож}}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}} \quad (61)$$

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:

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}} \quad (62)$$

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 Ж 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  $K_{\text{д}} = 1,15$ . 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  $T_k = 1,212$ . 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 линейный график осуществления проекта, представленный в приложении 3.

### 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 работе реактора ВВЭР – 1000. Для того чтобы узнать это, был произведен анализ потребителей. В качестве первого критерия, а именно потребителей были выбраны основные ядерные паро-производящие установки, эксплуатируемые в России. Вторым критерием было выбрано количество данных установок. В таблице представлена карта сегментирования рынка в России ядерных паропроизводящих установок на январь 2020 года.

Таблица 11 – Карта сегментирования рынка ЯППУ

		Тип ЯППУ		
		ВВЭР – 1000	РБМК – 1000	БН – 800
Количество ЯППУ	10 – 13			
	2 – 10			
	1 – 2			



По итогам составления карты сегментирования Российского рынка ЯППУ видно, что энергоблок с ядерной установкой типа ВВЭР-1000 преобладает на российском рынке. В ЯППУ типа ВВЭР-1000 в качестве теплоносителя используется легкая вода, а ядерная установка с легкой водой в качестве теплоносителя наиболее привлекательны, так как легкая вода имеет ряд преимуществ по сравнению с остальными типами теплоносителей. Самые главные преимущества – это ее дешевизна и доступность. Этим и объясняется то, почему ЯППУ с ней так распространены на Российском рынке. Также данный вид ЯППУ активно экспортируется за рубеж [16].

### **3.3 Анализ конкурентных технических решений**

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 2. В качестве конкурирующих разработок были приняты: К1 – РБМК-1000, К2 – БН-800. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

В первом случае ЯППУ в качестве теплоносителя используется легкая вода, во втором случае теплоносителем является жидкий натрий, в качестве топлива обогащенный уран (в БН-800 МОХ-топливо).

Таблица 12 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентноспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство	0,02	5	4	3	0,1	0,08	0,06
2. Энергоэкономичность	0,04	5	4	3	0,25	0,16	0,12
3. Надежность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
4. Уровень воздействия на окружение	0,01	5	4	5	0,05	0,04	0,05
5. Безопасность	0,25	5	4	4	1,25	1,00	1,00
6. Материалозатратность	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Стоимость топлива в зависимости от обогащения по изотопу U <sup>235</sup>	0,1	4	5	3	0,4	0,5	0,3
2. Стоимость теплоносителя	0,05	4	4	3	0,12	0,12	0,09
3. Конкурентоспособность энергетической установки	0,05	5	3	3	0,05	0,03	0,03
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	5	3	5	1	0,6	1
5. Обслуживание после введения в эксплуатацию	0,07	5	2	5	0,35	0,14	0,28
6. Длительность топливного цикла	0,18	5	3	4	0,90	0,54	0,72
Итого	1	52	41	42	3,98	3,03	3,29

Из данного анализа видно, что рассматриваемая ЯППУ (ВВЭР – 1000) не имеет особых преимуществ перед конкурентами, но она более сбалансирована, имеет широкое распространение на рынке ядерной энергетике. Ядерная энергетическая установка БН-800 является основным конкурентом из-за возможности наработки ядерного горючего, малого запаса реактивности и отсутствия замедлителя, что увеличивает будущую перспективность данной ядерной энергетической установки. Но данная разработка пока мало распространена на рынке, обладает меньшей мощностью, имеет новую эксплуатационную технологию, требует больших материальных ресурсов и неоднократных физических экспериментов. Основным недостатком ядерной установки РБМК-1000 являются то, что на данной установке произошла самая масштабная авария в истории человечества и было принято решение, что

дальнейшую разработку и модернизацию этой установки прекратить, а для оставшихся энергоблоков продолжить эксплуатацию до полной выработки энергоресурса.

### **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 установки.

Сильными сторонами реакторной установки ВВЭР – 1000 можно назвать следующие свойства и особенности:

- использование корпусной схемы, что увеличивает безопасность установки;
- использование активных и пассивных систем безопасности;
- доступность и дешевизна теплоносителя;
- наличие высокой замедляющей способности, а следовательно высокое энерговыделение с единицы объема.

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, а поэтому должно использоваться только обогащенное топливо, 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 увеличивает затраты на эксплуатацию.

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

К возможностям данной ЯЭУ 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 проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

К угрозам можно отнести:

- природные катаклизмы: землетрясения, цунами, смерчи;
- снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок;
- угроза диверсионных и террористических действий в отношении ЯЭУ.

В таблице 13 представлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в бакалаврской работе.

Таблица 13 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Использование корпусной схемы увеличивает безопасность установки; использование активных и пассивных систем безопасности;</li> <li>2. Доступность, а следовательно дешевизна воды, а также отработанные технологии по ее получению;</li> <li>3. Наличие высокой замедляющей способности, а следовательно высокое энерговыделение с единицы объема.</li> </ol>	<p><b>Слабые стороны:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Относительно высокое поглощение нейтронов водой, а поэтому должно использоваться только обогащенное топливо, что приводит к увеличению его стоимости;</li> <li>2. Высокое давление при энергетически приемлемых температурах;</li> <li>3. Коррозионная активность воды с конструкционными материалами, что приводит к использованию двуокиси урана и нержавеющей стали, это ухудшает баланс нейтронов увеличивает затраты на эксплуатацию.</li> </ol>
<p><b>Возможности:</b></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>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Удачное совмещение конструкционных материалов в установке, обеспечивает надежную эксплуатацию и высокие показатели выработки электроэнергии.</li> <li>2. Системы безопасности установки отвечают всем требованиям, которые предъявляются к современным АЭС,</li> <li>3. Увеличение привлекательности данной энергетической установки среди потенциальных стран</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Необходимость иметь высокое давление в реакторе усложняет конструкцию корпуса реактора и его отдельных узлов;</li> <li>2. Большое сечение поглощения нейтронов водой требует увеличение обогащения ядерного топлива, что может увеличить стоимость электроэнергии;</li> <li>3. Коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом заставляет применять двуокись урана и нержавеющей стали</li> </ol>

	заказчиков данного проекта.	конструкционные материалы; 4. Радиолиз воды и коррозионная активность могут вызвать некоторые трудности при переходе на одноконтурную схему.
<b>Угрозы:</b> У1. Природные катаклизмы. У2. Снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок. У3. Наличие угрозы несанкционированных действий в отношении ЯЭУ.	1. Преимущества ЯППУ ведут за собой привлечение действий террористического и диверсионного характеров. 2. Преимущества реактора перед конкурентами вызывает дополнительный интерес у государства.	1. Наличие высокого давления делает ЯППУ уязвимой перед природными катаклизмами. 2. Возникновение аварии сможет снизить интерес к проектам подобного рода.

Проведённый SWOT-анализ позволяет с достаточной для данной работы точностью определять дальнейшее положение рассматриваемого объекта на соответствующем рынке. Наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями страны-партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Данная стратегия выбрана ввиду того, что предприятие, заинтересованное в ЯЭУ на российском рынке, одно (Росэнергоатом). В свою очередь, данное предприятие требует тесного взаимодействия с другими производственными компаниями.

### 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.

Введём некоторые обозначения:

- $TP_{\text{общ}}$  – общая трудоёмкость проекта;
- $TP_i$  ( $TP_k$ ) – трудоёмкость  $i$ -го ( $k$ -го) этапа проекта,  $i = \overline{1, I}$ ;
- $TP_i^H$  – 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):

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}} \quad (63)$$

Применительно к таблице, представленной в приложении А, 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 14.

Таблица 14 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	$TP_i, \%$	$CG_i, \%$
Постановка задачи	3,74	3,74
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	7,05	10,79
Подбор и изучение материалов по тематике	14,57	25,36
Разработка календарного плана	4,11	29,47
Обсуждение литературы	4,48	33,94
Выбор исходных параметров	12,69	46,64
Методика расчета	20,16	66,80
Нейтронно-физический расчет	17,08	83,87
Оформление расчетно-пояснительной записки	6,40	90,28

Этап	ТР <sub>i</sub> , %	СГ <sub>i</sub> , %
Оформление графического материала	3,74	94,01
Подведение итогов	5,99	100,00

Очевидно, 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 15.

Таблица 15 – 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:

$$C_{\text{МАТ}} = 1300 \cdot 1,05 = 1365.$$

### 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 исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-г}} = \frac{МО}{25,083} \quad (64)$$

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

Пример расчёта затрат на полную заработную плату приведены в таблице 6. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из приложения А. 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:

$$K_{\text{И}} = K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{Доп.ЗП}} \cdot K_{\text{Р}} ; \quad (65)$$

$$K_{\text{И}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699 .$$

Таблица 16 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{\text{И}}$	Фон з/п, руб.
НР	35120	1400,15	17	2,028	48271,57
И	12130	483,59	26	2,028	25498,73
Итого:					73770,30

### 3.6.3 Расчёт затрат на страховые взносы

Затраты на страховые взносы, включающие в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование согласно ФЗ от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, водится пониженная ставка – 30,2%:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,302 ; \quad (66)$$

$$C_{\text{соц}} = 73770,30 \cdot 0,302 = 22278,63 \text{ руб.}$$

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:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (67)$$

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

$C_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;

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

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

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

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (68)$$

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

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

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_c, \quad (69)$$

где  $P_{\text{ном}}$  – 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 17.

Таблица 17 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	192	0,3	331,1
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			332,25

### 3.6.5 Расчёт амортизационных расходов

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

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot n}{F_{\text{Д}}}, \quad (70)$$

где  $H_{\text{А}}$  – 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:

$$H_A = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать:

$$C_{AM} = \frac{0,4 \cdot 208 \cdot 100000 \cdot 1}{2384} = 3489,93.$$

### 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:

$$C_{ПРОЧ} = (C_{МАТ} + C_{ЗП} + C_{СОЦ} + C_{ЭЛ.ОБ} + C_{AM}) \cdot 0,1. \quad (71)$$

Прочие расходы в нашем случае:

$$C_{ПРОЧ} = (1365 + 73770,30 + 22278,63 + 332,25 + 3489,93) \cdot 0,1 = 10123,61 \text{ руб..}$$

### 3.6.7 Расчёт суммарной себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Расчет и анализ ядерного реактора типа ВВЭР с использованием программы WIMS» (таблица 18).

Таблица 18 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма	
		, руб.	, %
Материалы и покупные изделия	$C_{МАТ}$	1365,00	1,23
Основная заработная плата	$C_{ЗП}$	73770,30	66,25
Страховые взносы	$C_{СОЦ}$	22278,63	20,01
Расходы на электроэнергию	$C_{ЭЛ.ОБ}$	332,25	0,30
Амортизационные отчисления	$C_{AM}$	3489,93	3,13
Прочие расходы	$C_{ПРОЧ}$	10123,61	9,09
Итого:		111359,72	100,00

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = 111359,72$  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:

$$G = C \cdot 0,2; \quad (71)$$

$$G = 111359,72 \cdot 0,2 = 22271,94 \text{ руб.}$$

### 3.6.9 Расчёт НДС

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

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2; \quad (72)$$

$$\text{НДС} = (111359,72 + 22271,94) \cdot 0,2 = 26726,33 \text{ руб.}$$

### 3.6.10 Цена разработки проекта

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (73)$$

$$C_{\text{НИР}} = 111359,72 + 22271,94 + 26726,33 = 160357,99 \text{ руб.}$$

### 3.6.11 Оценка экономической эффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности [2]. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{фин}^{исп_i} = \frac{\Phi_{P_i}}{\Phi_{max}},$$

где  $I_{фин}^{исп_i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{P_i}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

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

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Ввиду закрытости или отсутствия данных экономической эффективности и определение срока окупаемости данного проекта невозможно.

## **4 Социальная ответственность**

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социальноэкономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебнопрофилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [17].

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками [18].

Опасным производственным фактором, согласно, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

### **4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **4.1.1 Правовые нормы трудового законодательства**

На работах с вредными или опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, выдаются прошедшие обязательную сертификацию или декларирование соответствия средства индивидуальной защиты в соответствии с типовыми нормами, утвержденными в порядке, установленном



Правительством Российской Федерации [19].

Для предупреждения заболеваний, связанных с работой на реакторной установке необходима рациональная организация труда и отдыха, которая нормируется в соответствии с санитарными правилами [20].

Так как данный вид работ подразумевает возможное наличие угроз жизни и здоровья (таких как работа под действием повышенного фона излучения), следует обеспечить работника всеми необходимыми мерами защиты – рабочими перчатками, для предотвращения попадания источников радиоактивного излучения на руки при касании каких-либо частей конструкции; очками, для исключения попадания инородных тел в глаза и область глаз; спец. одеждой, как мерой индивидуальной защиты работника и другими средствами защиты в зависимости от выполняемой человеком работы. Каждому работнику должно быть предоставлено рабочее место с учётом специфики работы. Рабочее помещение должно оборудоваться системами отопления, кондиционирования воздуха или эффективной приточно-вытяжной вентиляцией.

Помещения должны иметь естественное и искусственное освещение.

Для внутренней отделки интерьера помещений должны использоваться диффузно-отражающие материалы с коэффициентом отражения для потолка –  $0,7 \div 0,8$ ; для стен –  $0,5 \div 0,6$ ; для пола –  $0,3 \div 0,5$ .

Поверхность пола в рабочем помещении должна быть ровной, без выбоин, нескользкой, удобной для очистки и влажной уборки, обладать антистатическими свойствами. В помещении должны находиться аптечка первой медицинской помощи.

#### 4.1.2 Организация рабочего места исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне лёгкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 10.

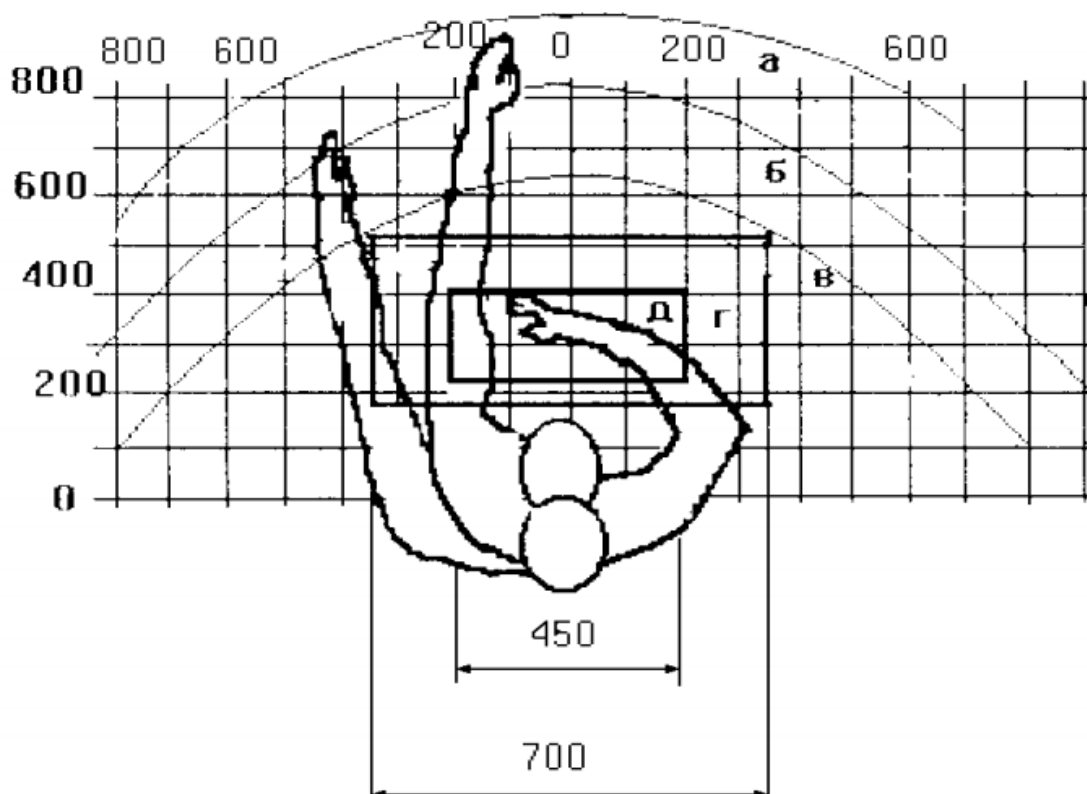


Рисунок 10 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

При проектировании письменного стола должны быть учтены ниже описанные требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680÷800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься 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 [21].

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем [21].

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана [21].

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100÷300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами [21].

## **4.2 Производственная безопасность**

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов (таблица 19), оказывающих влияние на выполнение данной работы [21].

В таблице 19 представлены предполагаемые факторы, оказывающие влияние на студента, проводимого расчёты на ПК.

Таблица 19 – Предполагаемые опасные и вредные факторы при эксплуатации реакторной установки

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1.Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [20]. СанПиН 2.2.4.3359–16.Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах [21].
2. Превышение уровня шума	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [22]. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [23].
3.Отсутствие или недостаток естественного света	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [24].
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [25].
5. Повышенный уровень электромагнитных излучений	СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ). Санитарные правила и нормы [26].
6. Психофизиологические факторы	Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда [27].
7.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление [29]. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [30].

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [20] и приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23÷25	40÷60	0,1
Тёплый	23÷25	40	0,1

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания [21].

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ [21].

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение (ЭМИ). Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля.

Действие ЭМИ на центральную нервную систему при плотности потока

энергии (ППЭ) более 1 мВт/см свидетельствует о ее высокой чувствительности к электромагнитным излучениям. Изменения в крови наблюдаются, как правило, при ППЭ выше 10 мВт/см. При меньших уровнях воздействия наблюдаются фазовые изменения количества лейкоцитов, эритроцитов и гемоглобина (чаще лейкоцитоз, повышение эритроцитов и гемоглобина). При длительном воздействии ЭМП происходит физиологическая адаптация или ослабление иммунологических реакций. Поражение глаз в виде помутнения хрусталика— катаракты — является одним из наиболее характерных специфических последствий воздействия ЭМИ. Помимо этого, следует иметь в виду и возможность неблагоприятного воздействия ЭМИ на сетчатку и другие анатомические образования [27]

Согласно [20], напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц: 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц: 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц: 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц: 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

Освещенность рабочего места оператора на рабочем столе в горизонтальной плоскости от общего искусственного освещения должна быть от 300 до 500 лк. Для освещения зоны расположения документов допускается

установка светильников местного освещения. Отношение яркостей в зоне наблюдения (экран, документ, поверхность стола) должно быть не более 10:1 [21].

Психофизиологические факторы — это физические и эмоциональные перегрузки, умственное перенапряжение, монотонность труда. Тяжесть труда отражает нагрузку на опорно-двигательный аппарат и функциональные системы организма (сердечно-сосудистую, дыхательную, нервную). Условия труда устанавливаются по основным показателям тяжести трудового процесса.

Напряженность труда — количественная характеристика умственного труда. Она определяется величиной информационной нагрузки.

При оценке напряженности умственного труда используют показатели внимания, напряженности зрительной работы и слуха, монотонности труда.

Напряженность труда характеризуется рядом факторов, воздействующих преимущественно на центральную нервную систему, органы чувств и эмоциональную сферу человека. Оценка напряженности труда работающих основана на анализе характера труда и его структуры. По показателям напряженности условия труда подразделяются на 4 класса в зависимости от [28]:

- 1) интеллектуальной нагрузки;
- 2) сенсорных нагрузок;
- 3) эмоциональной нагрузки;
- 4) монотонности нагрузок;
- 5) режима работы: продолжительности рабочего дня в часах, сменности работы, количества и продолжительности регламентированных перерывов.

Причины воздействия электрического тока на организм человека могут обуславливаться различными факторами и ситуациями. Из-за этих отличий в ситуациях правила регламентируют использование тех или иных средств защиты или вменяют в обязательства выполнение определенных мер. В связи с чем, причины поражения подразделяются на такие, которые могут случаться в бытовых условиях, и те, которые могут возникать на производстве.

Наиболее частыми причинами поражения являются какие-либо неисправности или неосторожное обращение самого человека с эксплуатируемыми устройствами. Сила тока, воздействующая на человека, зависит от сопротивления электрической цепи, в которую входят сопротивление кожи, обуви, растеканию тока в полу или какой-либо другой точке. Наименьшая величина сопротивления получается в случае наличия ранок на коже, мокрой поверхности рук или когда человек касается заземленных элементов.

Согласно [29, 30], при всех случаях электрического травматизма организм получает три основных воздействия тока:

— термическое воздействие приводит к возникновению ожогов в точках воздействия электротока, в зависимости от условий протекания электрического удара могут образовываться легкие, средние или тяжелые ожоги;

— динамическое воздействие вызывает сокращение и последующее повреждение мышц и связок, а также судорожное сжатие конечностей, при котором человек не может самостоятельно разжать пальцы рук и освободиться от действия тока, тот же эффект происходит и с сердцем, что может вызвать смертельный шок;

— электролитическое воздействие, при котором прохождении электротока по сосудам, где кровь выступает в роли проводника, который при длительном воздействии разлагается на плазму и кровяные тельца.

В зависимости от ситуации повреждение может также привести к электрическому шоку. Состояние пострадавшего при этом характеризуется отсутствием адекватной реакции на происходящие события и расширенными зрачками. В таком состоянии сложно судить о нанесенных повреждениях организму, из-за того, что человек не может сообщить о собственном самочувствии. Поэтому его состояние определяется по косвенным факторам (пульс, дыхание и т.д.).

Чтобы избежать поражения током и минимизировать причины, способные его обусловить достаточно придерживаться ряда простых правил:



- не прикасаться к электрическим приборам, выключателям, вилкам, розеткам мокрыми руками;
- не допускать включения в сеть неисправных приборов или устройств, у которых отсутствует заземление корпуса (отсутствие допускается только у приборов, рассчитанных на очень низкое напряжение);
- не нарушать указаний, предписываемых электрическими знаками, которые регламентируют те или иные действия;
- не бросать включенными приборы, уходя из дома, не допускать выдергивания вилки за шнур;
- при работе в электроустановках обязательно выполнять требования правил, инструкций, порядок технологических процессов;
- работу в электроустановках выполнять только с применением необходимых средств защиты.

### **4.3 Экологическая безопасность**

Охрана окружающей среды на предприятии характеризуется комплексом принятых мер, которые направлены на предупреждение отрицательного воздействия человеческой деятельности предприятия на окружающую природу, что обеспечивает благоприятные и безопасные условия человеческой жизнедеятельности. Учитывая стремительное развитие научно-технического прогресса, перед человечеством встала сложная задача – охрана важнейших составляющих окружающей среды (земля, вода, воздух), подверженных сильнейшему загрязнению техногенными отходами и выбросами, что приводит к окислению почвы и воды, разрушению озонового слоя земли и климатическим изменениям. Промышленная политика всего мира привела к таким необратимым и существенным изменениям в окружающей среде, что этот вопрос (охрана окружающей среды на предприятии) стал общемировой проблемой и принудил государственные аппараты разработать долгосрочную экологическую политику по созданию внутригосударственного контроля за ПДВ.

Как правило, в качестве промышленных отходов выступают: бумага, строительные отходы, коробки и т.п. В случае реакторной установки к этому добавляются радиоактивные отходы, так же всевозможные утечки, которые влекут значительные экологические последствия. Избавление от радиоактивных отходов и связанных с работой за установкой прочих отходов производится специализированными службами при заполнении соответствующей документации и подготовке отчётности, так как менеджмент радиоактивных отходов является отдельным направлением подготовки специалистов.

В соответствии с загрязнителями атмосферы не предполагается при использовании непосредственно самой реакторной установки, но в рамках безопасности предполагается использование фильтров и нормирование заранее согласованных выбросов в атмосферу.

Загрязнение гидросферы может произойти при утечке как радиоактивных отходов, так и теплоносителя, в данном случае натрия, что повлечёт за собой радиоактивное загрязнение области. Для предотвращения подобных событий предусмотрена система нескольких контуров реакторной установки для предотвращения утечки облучённого теплоносителя из активной зоны, также несколько степеней защиты, финальным из которых является биологическая защита. Все средства безопасности выстроены при учёте соответствующей нормативной документации.

Загрязнение литосферы имеет схожие черты с загрязнением гидросферы, поэтому помимо указанных выше факторов и мер безопасности стоит добавить только наличие вероятности выноса за пределы ядерного объекта облучённых канцелярских принадлежностей или одежды. Данные действий должны быть предотвращены охраной объекта и датчиками системы безопасности.

#### **4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайные ситуации относятся к совокупности опасных событий или явлений, приводящих к нарушению безопасности жизнедеятельности. К ним

относятся: высокие и низкие температуры, физическая нагрузка, поражающие токсичные дозы сильнодействующих ядовитых веществ, высокие дозы облучения, производственные шумы и вибрации и многое другое могут приводить к нарушению жизнедеятельности человека. Основными причинами возникновения чрезвычайных ситуаций являются, во-первых, внутренние, к которым относятся: физический износ оборудования, низкая трудовая и технологическая дисциплина, проектные конструкторские недоработки, сложность технологий, недостаточная квалификация персонала, во-вторых, внешние чрезвычайные ситуации, такие как стихийные бедствия, неожиданное прекращение подачи электроэнергии, воды, продуктов, террористические и военные действия [31, 32].

Одними из наиболее вероятных и разрушительных видов ЧС являются взрыв или пожар в производственном участке при несоблюдении предписанных норм пожарной безопасности или же вследствие короткого замыкания или проблем с токопроводящим оборудованием.

Пожарная профилактика основывается на исключении условий, необходимых для горения, и использования принципов обеспечения безопасности. При обеспечении пожарной безопасности решаются следующие задачи:

- возгорание;
- локализация возникших пожаров;
- защита людей и материальных ценностей;
- предотвращение пожаров;
- тушение пожара.

Для предотвращения возникновения пожаров необходимо:

1. Проводить профилактические мероприятия, инструктажи рабочих.
2. В каждом цехе должны быть предусмотрены меры эвакуации, например, запасные выходы, пожарные проходы, висеть планы эвакуации.

3. Обязаны присутствовать средства пожаротушения (в качестве первичных средств пожаротушения пенные огнетушители ОХВП-10, углекислотные огнетушители ОУ-2, ОУ-5, и ОУ-8 1-у штуки на 700 м<sup>2</sup> площади, ящики с песком 1-ин на 500 м<sup>2</sup> площади).

4. В доступном месте должны висеть инструкции по действиям при пожаре с указанием последовательности действий, а также планов эвакуации с телефонами спецслужб, куда стоит сообщить о возникновении чрезвычайной ситуации.

5. Обязательно наличие звуковой пожарной сигнализации.

6. Система пожарной сигнализации включается в общезаводскую/общецеховую систему пожарных извещателей кольцевого типа. Оповещение рабочих происходит через местную связь (радиосвязь).

При возникновении пожара (задымление, запах гари, отблеск пламени, повышение температуры и т. п.), необходимо:

— немедленно сообщить об этом по телефону в пожарную охрану (при этом необходимо назвать адрес объекта, место возникновения пожара, а также сообщить свою фамилию);

— поставить в известность руководство, диспетчера или ответственного дежурного по объекту о наличии возгорания или его признаков;

— по возможности принять меры для эвакуации людей;

— по возможности принять меры для тушения пожара.

До приезда пожарных следует попытаться ликвидировать очаг пожара с помощью первичных средств пожаротушения (песка, плотной негорючей ткани, огнетушителей и воды из пожарных кранов). В первые 7—10 мин после начала возгорания это в ряде случаев удается сделать, или удается хотя бы несколько локализовать огонь на горящих поверхностях.

Для тушения пожара в электроустановках обязательно следует их обесточить.

При тушении пожаров часто пользуются водой. Сплошной струей можно

сбить пламя. Сплошную струю можно подать на большое расстояние. Распыленные струи, состоящие из мелких капель воды, орошают большую поверхность, способствуют интенсивному испарению и тем самым охлаждению зоны горения. Распыленными струями можно тушить горючие жидкости. При этом распыленная вода должна покрывать всю горящую поверхность, а также орошать прилегающие поверхности.

Некоторые вещества не подлежат тушению водой. Например, горение битумов, жиров, масел при тушении водой усиливается, что сопровождается их вскипанием и разбрызгиванием; серная кислота, хлорид титана вызывают сильный разогрев; магний, цинк разлагаются с выделением горючих газов; алюмоорганические соединения вызывают взрыв.

При неэффективности предпринятых действий необходимо быстро выйти на улицу. Следует учитывать, что скорость распространения дыма очень высока (20 м/мин). Даже при незначительных возгораниях задымление путей эвакуации происходит в считанные минуты. Задымление верхних этажей зданий происходит примерно за 2—3 мин, а температура в объеме лестничной клетки в течение 5 минут может достичь 200 °С (для человека опасна уже температура 60 °С).

Экстренная эвакуация людей проводится через ближайший запасный выход или по пожарной лестнице. Она также возможна через окна первого этажа. Если помещение с людьми заблокировано огнем или плотным задымлением и выйти из него невозможно, то следует закупорить вентиляционные отверстия и щели в дверях мокрой тканью. Это снизит интенсивность проникновения дыма. Далее голосом через окно следует привлечь внимание находящихся внизу людей (чтобы о вас знали). В этом случае, как только придут пожарные, они незамедлительно организуют помощь. Первоочередной задачей пожарных по прибытии на пожар является выявление людей, отрезанных огнем и дымом [33].

## Заключение

В результате проделанной работы для заданного типа реактора типа ВВЭР было выполнено следующее:

- выполнен предварительный расчет реактора: определены размеры активной зоны и скорость прокачки теплоносителя, равна 8,695 м/с, что соответствует установленным требованиям;
- проведен расчет концентраций элементов активной зоны и гомогенизация элементарной ячейки;
- проведен расчет микроскопических и макроскопических сечений элементов активной зоны;
- проведен расчет коэффициента размножения нейтронов для бесконечной среды  $k_{\infty} = 1,326$ ;
- проведена оптимизация параметров ячейки по шагу расстановки ТВЭЛОВ и внешнему радиусу топливного блока, выбраны оптимальные размеры ячейки, которым соответствует  $k_{\infty} = 1,49$ ;
- проведен расчет эффективного коэффициента размножения нейтронов  $k_{эф} = 1,317$ ;
- проведен расчет «горячего» состояния реактора в одnogрупповом приближении, где  $k_{\infty} = 1,273$ ,  $k_{эф} = 1,249$ ;
- проведен многогрупповой расчет, где были определены  $k_{эф}$  для «горячего» и «холодного» состояния реактора», была определена кампания ядерного топлива, которая равна 400 суток;
- был проведен перерасчет в программе WIMS-5D, который показал довольно близкие значения, с предыдущими расчетами как  $k_{эф}$ , так и графики изменения нуклидного состава. Расхождение в значениях коэффициентов размножения не более 7,2 %, основное расхождение составила только длительность кампании топлива. В данной программе кампания топлива

составила 900 эфф. суток, что соответствует данному типу реактора;

– потеря реактивности во время стационарного отравления  $\text{Xe}^{135}$ .  
составляет: – 0,0355;

– потеря реактивности во время стационарного отравления  $\text{Sm}^{149}$   
составляет: – 0,0091;

– предделение сильных и слабых сторон рассматриваемого объекта (SWOT-анализ) – реактора ВВЭР – 1000 – показало, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности.

– 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.

– бюджет научно-технического исследования составил 160357,99 рублей. Бюджет научно-технического исследования состоит из материальных затрат (1365,00 руб.), затрат на оплаты труда (73770,30 руб.), расходов на электроэнергию (332,25 руб.), затрат на страховые взносы (22278,63 руб.), амортизационных отчислений (3489,93 руб.) и прочих расходов (10123,61 руб.).

– оценка экономической эффективности не проведена по причине отсутствия данных.

## Список литературы

1. ВВЭР – 1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность / Аль Афров А. М., Андрушенко 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.
2. 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 политехнический университет, 2015. – 192 с.
3. Колпаков Г. Н. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие / Селиваникова О. В. – Томск: Издво Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
4. Тепловыделяющая сборка ТВСА ВВЭР-1000: направления развития и результаты эксплуатации Кандалов В. Б., Преображенский Д. Г., Романов А. И., Самойлов О. Б., Фальков А. А., Шишкин А. А. – М., Энергоатомиздат, 2014. – 318 с.
5. ВВЭР – 1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность / Аль Афров А. М., Андрушенко 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.
6. Таблетка ядерного топлива с покрытием (ее варианты), способ нанесения покрытия и установка для осуществления способа: патент Рос. Федерация № 2131626, заявл. 20.04.2017, опубл. 13.03.2006, Бюл. № 3 – 4 с.
7. Основные правила обеспечения эксплуатации атомных станций [Электронный ресурс] / Url: <http://www.gosthelp.ru/text/STO1110106782007Osnovnyep.html>
8. Свойства материалов оболочки и топливных таблеток реактора ВВЭР-1000, отчет ВНИИНМ. 312-0-001. М., ГКАЭю 1983 (инв. № 211351 ОКБ «Гидропресс»).



9. Острейкин В. А. Эксплуатация атомных станций: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с.
10. 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 политехнический университет, 2015. – 192 с.
11. Крянев А.В., Шихов С.Б. Вопросы математической теории реакторов: линейный анализ – М.: Атомиздат, 1973. – 375 с.
12. Ершов Ю.И., Шихов С.Б. Математические основы теории переноса: в 2 т., Т. 2: Приложения к физике реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 256 с.
13. 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.
14. Групповые константы для расчёта ядерных реакторов / Абагян Л. П., Базазянц Н. О., Бондаренко И. И., Николаев М. Н. – М., Атомиздат, 1964. – 137 с.
15. Кузьмина Е. А. Методы поиска новых идей и решений / Кузьмин А.М. – «Методы менеджмента качества» № 1 2003 г.
16. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
17. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 № 181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07. – [С. 4]
18. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.
19. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020) // Российская газета. – № 256. – 2001. – 494 с.

20. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы // Российская газета. – № 120. – 2003. – 18 с.
21. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.
22. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2019. – 23 с.
23. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 6 с.
24. СанПиН 2.2.4.3359–16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420362948> (дата обращения 20.05.2020).
25. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 6 с.
26. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности (Переиздание). – М.: Стандартинформ, 2019. – 50 с.
27. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ). Санитарные правила и нормы СП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001537> (дата обращения 30.05.2020).
28. 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения 20.05.2020).
29. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 13 с.

30. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 8 с.
31. ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 13 с.
32. ГОСТ 22.0.07-97 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров (аутентичен ГОСТ Р 22.0.07-95). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 10 с.
33. Порядок действий работников при пожаре Обязанности работников при обнаружении признаков пожара [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scicenter.online/bezopasnosti-jiznedeyatelnosti-osnovyi-scicenter/poryadok-deystviy-rabotnikov-pri-pojare-59266.html> (дата обращения 30.05.2020).

## Приложение А

Таблица А.1 – Микроскопические и макроскопические сечения для всех элементов

Материалы	$\sigma_a$	$\sigma_f$	$\sigma_s$	$\sigma_c$	$\mu_s$	$\sigma_{tr}$	$\Sigma_a$	$\Sigma_f$	$\Sigma_s$	$\Sigma_c$	$\Sigma_{tr}$	$\xi$	$\xi\Sigma_s$
U <sup>238</sup>	2,0 73	0	9	2,7 1	0	11,0 73	0,0 45	0	0,201	0,0 34	0,176	8,38·10 <sup>-3</sup>	1,689 ·10 <sup>-3</sup>
O <sub>(в топливе)</sub>	0	0	0	3,7 5	0,0 5	3,56 3	0	0	0,171	0	0,162	1,199 ·10 <sup>-1</sup>	2 ·10 <sup>-2</sup>
UO <sup>2</sup>	–	–	–	–	–	–	0,5 89	0,4 66	0,382	0,1 77	0,963	2,2 ·10 <sup>-2</sup>	2,2 ·10 <sup>-2</sup>
Zr	0,1 42	0	6,2	0,1 85	0,0 1	6,28	0,0 06	0	0,262	0,0 08	0,265	2,182 ·10 <sup>-2</sup>	5, 708 ·10 <sup>-3</sup>
Sn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,947 ·10 <sup>-2</sup>	0
Fe	1,9 35	0	11, 4	2,5 3	0,0 1	13,2 21	0	0	0,001	0	0,001	3,529 ·10 <sup>-2</sup>	3,5·10 <sup>-5</sup>
Cr	1,9 35	0	4,2	3,1	0,0 1	6,09 4	0	0	0	0	0	3,797 ·10 <sup>-2</sup>	1·10 <sup>-5</sup>
He	0	0	0,8 55	0	0,1 67	0,71 2	0	0	2,297 ·10 <sup>-5</sup>	0	1,913·10 <sup>-5</sup>	4,25 ·10 <sup>-1</sup>	9,769 ·10 <sup>-6</sup>
H <sub>2</sub> O	–	–	–	–	–	–	0,0 12	0	1,437	0	1,243	5,056 ·10 <sup>-1</sup>	7,27 ·10 <sup>-1</sup>

## Приложение Б

Таблица Б.1 – Результат расчетов макроскопических сечений для 1-й и 2-й гомогенизации

Материалы	1-я гомогенизация					2-я гомогенизация				
	$\Sigma_a$	$\Sigma_f$	$\Sigma_s$	$\Sigma_c$	$\Sigma_{tr}$	$\Sigma_a$	$\Sigma_f$	$\Sigma_s$	$\Sigma_c$	$\Sigma_{tr}$
$U^{238}$	0,0 14	0	0,0 6	0,0 18	0,0 73	0,0 3	0	0,1 3	0,0 39	0,1 59
$O_{(в\ топливе)}$	0	0	0,0 68	0	0,0 64	0	0	0,1 13	0	0,1 07
$UO^2$	0,1 85	0,1 42	0,1 32	0,0 52	0,3 09	0,3 9	0,3 08	0,2 53	0,1 12	0,6 37
Zr	0,0 01	0	0,0 32	0,0 01	0	0,0 02	0	0,0 69	0,0 02	0,0 7
Sn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
He	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$H_2O$	0,0 12	0	1,4 37	0	1,2 43	0,0 22	0	2,6 7	0	0,0 7

## Приложение В

Таблица В.1 – Значения с поправками на самоэранировку

Группа	$\sigma_0^{U^{238}}$	$\sigma_0^{U^{235}}$	$\sigma_0^{Zr}$	$\sigma_0^{Sn}$	$\sigma_0^{Fe}$	$\sigma_0^{Cr}$	$\sigma_0^O$	$\sigma_0^H$	$f_c^{U^{238}}$	$f_f^{U^{235}}$	$f_c^{U^{235}}$	$f_c^{Zr}$	$f_c^{Sn}$	$f_c^{Fe}$	$f_c^{Cr}$	$f_c^O$	$f_c^H$
1	12,9	373,8	19,8	1598,2	12014,2	1068225	3,6	3,9	1	1	1	1	1	1	1	0,93	1
2	15,6	450,5	25,0	1926,1	14471,2	1286660	4,3	4,4	1	1	1	1	1	1	1	0,92	1
3	19,8	537,8	30,2	2295,4	17242,4	1532968	5,0	5,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	22,8	585,5	32,5	2492,2	18729,1	1665095	5,7	4,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	38,6	895,1	50,2	3794,5	28504,3	2533973	7,1	7,9	1	1	1	1	1	0,99	1	1	1
6	51,2	1163,6	65,5	4927,9	37015,7	3290617	9,2	9,9	1	1	1	1	1	0,98	1	1	1
7	52,7	1226,1	70,3	5198,2	39050,2	3471395	11,8	8,3	1	1	1	1	1	0,98	1	1	1
8	63,4	1473,8	85,1	6250,9	46945,5	4173252	15,2	8,8	1	1	1	1	1	0,97	1	1	1
9	74,5	1719,5	101,3	7292,6	54750,4	4867167	18,3	9,0	1	1	1	1	1	0,91	1	1	1
10	85,6	1951,9	114,9	8279,2	62136,3	5524514	21,2	9,6	1	1	1	1	1	0,68	1	1	1
11	91,8	2082,9	124,9	8840,1	66350,7	5898189	22,8	9,4	1	1	1	1	1	0,98	1	1	1
12	96,2	2195,9	131,0	9328,9	70014,9	6224279	24,2	10,2	0,98	1	1	0,99	1	0,95	1	1	1
13	97,3	2234,1	134,7	9505,9	71351,7	6342891	24,7	10,3	0,95	1	1	0,87	1	0,98	0,98	1	1
14	98,0	2273,8	138,3	9688,7	72732,9	6465805	25,3	10,6	0,81	1	1	0,76	1	0,80	0,96	1	1
15	98,1	2370,5	145,4	10115,8	75942,7	6751346	26,6	11,9	0,59	1	1	0,80	1	1	0,93	1	1
16	100,7	2325,8	140,6	9954,1	74720,9	6642833	26,1	11,2	0,45	1	1	0,64	1	1	1	1	1
17	99,1	3504,9	218,3	14963,9	112302,1	9983415	41,1	27,1	0,17	1	1	0,97	1	1	1	1	1
18	100,7	2720,9	170,2	11735,3	88190,6	7840186	31,4	16,8	0,13	1	1	1	1	1	1	1	1
19	101,6	4704,0	296,8	20175,7	151486,2	13466461	56,7	43,4	0,07	1	1	1	1	1	1	1	1
20	102,6	4303,3	272,9	18601,3	139543,9	12404923	51,9	38,4	0,08	1	1	1	1	1	1	1	1
21	101,7	5691,5	359,5	24377,6	182863,0	16255512	69,2	56,7	0,11	1	1	1	1	1	1	1	1
22	98,9	2112,5	129,8	9063,6	68008,6	6046235	23,4	8,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	100,1	2111,2	131,1	9150,5	68661,1	6104240	23,7	8,6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	101,8	2121,2	133,4	9306,6	69832,5	6208390	24,1	9,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	108,5	2142,8	142,2	9890,6	74214,2	6597889	25,9	10,6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$T_{гор}$	-	-	-	-	-	-	-	-	0,626	0,72	0,726	0,62	0,6	0,62	0,62	0,62	0,62
$T_{хол}$	-	-	-	-	-	-	-	-	0,761	0,57	0,581	0,76	0,7	0,76	0,76	0,76	0,76

## Приложение Г

Таблица Г.1 – Микроскопические сечения деления и поглощения с учетом самоэкранировки

Группа	$U^{235}$		$U^{238}$		Zr	Sn	Fe	Cr	O	H
	$\sigma_f$	$\sigma_c$	$\sigma_f$	$\sigma_c$	$\sigma_c$	$\sigma_c$	$\sigma_c$	$\sigma_c$	$\sigma_c$	$\sigma_c$
1	1,75	0,02	1	0	0,01	0,02	0,04	0,035	0,21	0
2	1,15	0,03	0,58	0,01	0,00	0,01	0,01	0,003	0,07	0
3	1,25	0,04	0,58	0,02	0,00	0,02	0,00	0,003	0,00	0
4	1,28	0,06	0,49	0,06	0,01	0,02	0,00	0,003	0	0
5	1,25	0,12	0,02	0,13	0,01	0,03	0,00	0,004	0	0
6	1,23	0,17	0	0,13	0,01	0,04	0,00	0,004	0	0
7	1,41	0,25	0	0,15	0,01	0,05	0,01	0,005	0	0
8	1,7	0,4	0	0,22	0,01	0,07	0,01	0,006	0	0
9	2,1	0,6	0	0,35	0,02	0,10	0,01	0,008	0	0
10	2,65	1	0	0,46	0,02	0,15	0,01	0,01	0	0
11	3,4	1,5	0	0,60	0,03	0,26	0,00	0,013	0	0
12	4,4	2,1	0	0,76	0,03	0,45	0,00	0,02	0	0
13	5,4	2,75	0	1,13	0,03	0,55	0,01	0,0294	0	0,001
14	7,3	3,8	0	1,71	0,04	0,70	0,08	0,048	0	0,001
15	11	6,3	0	2,14	0,13	1,70	0,02	0,0744	0	0,002
16	16	9,5	0	2,03	0,63	1,50	0,03	0,03	0	0,003
17	22	13,5	0	2,87	0,09	3,30	0,04	0,041	0	0,004
18	35	22	0	1,95	0,00	11,00	0,05	0,06	0	0,006
19	45	31	0	4,08	0,01	10,00	0,07	0,087	0	0,009
20	45	54	0	6,63	0,01	0,64	0,11	0,129	0	0,014
21	37	44	0	18,04	0,01	0,16	0,15	0,189	0	0,02
22	20	7	0	0,54	0,02	0,24	0,22	0,28	0	0,03
23	35	13	0	0,47	0,02	0,35	0,33	0,41	0	0,044
24	64	10	0	0,58	0,04	0,52	0,49	0,6	0	0,064
25	155	35	0	0,90	0,05	0,76	0,72	0,87	0	0,093
$T_{гор}$	335,35	2,42	0	1,70	0,11	1,68	1,57	3,1	0	0,206

## Приложение Д

Таблица Д.1 – Макроскопические сечения

Группа	$U^{235}$				$U^{238}$			
	$\Sigma_f$	$\Sigma_c$	$\Sigma_e$	$\Sigma_{in}$	$\Sigma_f$	$\Sigma_c$	$\Sigma_e$	$\Sigma_{in}$
1	$5,84 \cdot 10^{-4}$	$6,67 \cdot 10^{-6}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-4}$	$6,62 \cdot 10^{-3}$	0	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$
2	$3,84 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$6,41 \cdot 10^{-4}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$6,62 \cdot 10^{-5}$	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$
3	$4,17 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$	$6,37 \cdot 10^{-4}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$2,98 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$
4	$4,27 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$5,87 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$3,97 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$
5	$4,17 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$4,61 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$8,60 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$
6	$4,10 \cdot 10^{-4}$	$5,67 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$6,62 \cdot 10^{-3}$	$8,60 \cdot 10^{-4}$	$3,98 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$
7	$4,71 \cdot 10^{-4}$	$8,34 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$3,34 \cdot 10^{-4}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$9,93 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-2}$	$6,95 \cdot 10^{-3}$
8	$5,67 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$7,08 \cdot 10^{-2}$	$3,64 \cdot 10^{-3}$
9	$7,01 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$3,21 \cdot 10^{-3}$	$6,01 \cdot 10^{-5}$	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$	$8,14 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$
10	$8,84 \cdot 10^{-4}$	$3,34 \cdot 10^{-4}$	$3,44 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$3,01 \cdot 10^{-3}$	$8,60 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$
11	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$5,01 \cdot 10^{-4}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$	0	$6,62 \cdot 10^{-3}$	$3,89 \cdot 10^{-3}$	$8,87 \cdot 10^{-2}$	0
12	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$7,01 \cdot 10^{-4}$	$4,17 \cdot 10^{-3}$	0	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$4,76 \cdot 10^{-3}$	$9,73 \cdot 10^{-2}$	0
13	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$9,18 \cdot 10^{-4}$	$4,94 \cdot 10^{-3}$	0	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$6,55 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-1}$	0
14	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$5,31 \cdot 10^{-3}$	0	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$8,89 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-1}$	0
15	$3,67 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$4,91 \cdot 10^{-3}$	0	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-1}$	0
16	$5,34 \cdot 10^{-3}$	$3,17 \cdot 10^{-3}$	$4,17 \cdot 10^{-3}$	0	$6,62 \cdot 10^{-3}$	$8,51 \cdot 10^{-3}$	$9,27 \cdot 10^{-2}$	0
17	$7,34 \cdot 10^{-3}$	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$4,07 \cdot 10^{-3}$	0	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$4,17 \cdot 10^{-1}$	0
18	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$7,34 \cdot 10^{-3}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	0	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-1}$	0
19	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	0	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-1}$	$5,43 \cdot 10^{-1}$	0
20	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$1,80 \cdot 10^{-2}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	0	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-1}$	0
21	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	0	$6,62 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$1,26 \cdot 10^{-1}$	0
22	$6,67 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	0	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$	$5,96 \cdot 10^{-2}$	0
23	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$4,34 \cdot 10^{-3}$	$4,34 \cdot 10^{-3}$	0	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$3,11 \cdot 10^{-3}$	$5,96 \cdot 10^{-2}$	0
24	$2,14 \cdot 10^{-2}$	$3,34 \cdot 10^{-3}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$	0	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$5,96 \cdot 10^{-2}$	0
25	$5,17 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$5,01 \cdot 10^{-3}$	0	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$5,96 \cdot 10^{-3}$	$5,96 \cdot 10^{-2}$	0
T	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	$5,01 \cdot 10^{-3}$	0	$6,62 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$5,96 \cdot 10^{-2}$	0



## Приложение Е

Таблица Ж.1 – Многогрупповые константы

Группа	$\varepsilon^i$	$\Sigma_f$ , см <sup>-1</sup> 1	$B^2$ , см <sup>-2</sup>	D, см	$\Sigma_a$ , см <sup>-1</sup> 2	$\Sigma_R$ , см <sup>-1</sup>	$\Sigma_f^{U^{235}}$ , см <sup>-1</sup> 1	$\nu_f^{U^{235}}$	$\Sigma_f^{U^{238}}$ , см <sup>-1</sup>	$\nu_f^{U^{235}}$
1	0,021	0,078	0,000274	4,267	0,014	0,078	0,0006	3,40	0,0066	3,48
2	0,101	0,096	0,000280	3,466	0,007	0,088	0,0004	3,04	0,0038	3,09
3	0,192	0,119	0,000285	2,802	0,005	0,101	0,0004	2,79	0,0038	2,87
4	0,267	0,135	0,000288	2,462	0,004	0,111	0,0004	2,63	0,0032	2,67
5	0,194	0,234	0,000297	1,427	0,002	0,149	0,0004	2,52	0,0001	2,58
6	0,133	0,280	0,000299	1,192	0,001	0,177	0,0004	2,46	0,0066	0
7	0,057	0,305	0,000300	1,092	0,002	0,237	0,0005	2,47	0	0
8	0,022	0,353	0,000301	0,943	0,002	0,310	0,0006	2,45	0	0
9	0,009	0,402	0,000302	0,829	0,003	0,372	0,0007	2,44	0	0
10	0,003	0,449	0,000303	0,743	0,004	0,437	0,0009	2,43	0	0
11	0,001	0,471	0,000303	0,708	0,006	0,485	0,0011	2,42	0	0
12	0	0,500	0,000304	0,667	0,007	0,506	0,0015	2,42	0	0
13	0	0,509	0,000304	0,655	0,010	0,516	0,0018	2,42	0	0
14	0	0,516	0,000304	0,646	0,013	0,524	0,0024	2,42	0	0
15	0	0,540	0,000304	0,617	0,017	0,526	0,0037	2,42	0	0
16	0	0,516	0,000304	0,646	0,020	0,529	0,0053	2,42	0	0
17	0	0,840	0,000306	0,397	0,028	0,532	0,0073	2,42	0	0
18	0	0,593	0,000305	0,562	0,032	0,532	0,0117	2,42	0	0
19	0	1,103	0,000307	0,302	0,165	0,536	0,0150	2,42	0	0
20	0	0,720	0,000306	0,463	0,073	0,533	0,0150	2,42	0	0
21	0	0,653	0,000305	0,511	0,132	0,531	0,0123	2,42	0	0
22	0	0,469	0,000303	0,711	0,014	0,531	0,0067	2,42	0	0
23	0	0,476	0,000303	0,700	0,021	0,531	0,0117	2,42	0	0
24	0	0,487	0,000303	0,685	0,031	0,531	0,0214	2,42	0	0
25	0	0,529	0,000304	0,630	0,073	0,531	0,0517	2,42	0	0
T	0	0,644	0,000305	0,517	0,189	0,000	0,1119	2,42	0	0

## Приложение Ё

```
CELL 6
SEQUENCE 1
NGROUP 69
NMESH 71
NMATERIAL 3 1
NREGION 4
PREOUT
INITIATE
***** ** ***** **
ANNULUS 1 0.07 0 1
ANNULUS 2 0.3765 1 30
ANNULUS 3 0.455 2 10
ANNULUS 4 0.693 3 30

MATERIAL 1,-1,300.,1, $
    2235 0.000920 $
    8238 0.019869 $
    6016 0.041567 $
MATERIAL 2,-1,300.,2, $
    91 0.042586 $
    93 0.0004303 $
    178 0.00001291
MATERIAL 3,-1,300.,3 $
    3001 0.04872 $
    6016 0.02436

S 32
MESH 1 30 10 30

POWERC 1,39,2,1
BEGINC
BEGIN
```

## Приложение Ж

(обязательное)

Таблица А.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	2	1,40	1,61	0	1,95	0
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,40	2,76	0,28	3,35	0,34
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	3	6	4,20	1,45	4,83	1,76	5,85
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,40	1,61	0,16	1,95	0,19
Обсуждение литературы	НР, И	1	2	1,40	0,32	1,61	0,58	1,95
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	2	4	2,80	3,22	2,25	3,90	2,73
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	3	6	4,2	4,83	3,86	5,85	4,68
Расчет принципиальной схемы устройства	И	4	10	6,40	0	7,36	0	8,92
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	2	3	2,40	0	2,76	0	3,35
Оформление графического материала	И	1	2	1,40	0	1,61	0	1,95
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,40	0,97	1,61	1,18	1,95
Итого:				29,40	16,93	26,33	20,52	31,91

### Приложение 3

(обязательное)

Таблица Б.1 – Линейный график работы

Этап	НР	И	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42
1	1,95	0	■													
2	3,35	0,34	■	■												
3	1,76	5,85		■	■	■										
4	1,95	0,19				■	■									
5	0,58	1,95					■	■								
6	3,90	2,73						■	■							
7	5,85	4,68							■	■						
8	0	8,92									■	■	■	■		
9	0	3,35												■	■	
10	0	1,95													■	■
11	1,18	1,95														■

НР – ■; И – ■