

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

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Нейтронно-физический расчёт ядерного реактора типа УГР мощностью 1800 МВт УДК 621.039.52:621.039.512

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Моисеенко Дмитрий Витальевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Наймушин А.Г.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В.Ю.	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.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Р1	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.
Р2	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.
Р3	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.
Р4	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.
Р5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р6	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.
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Р8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; 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 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).
Р9	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.
Р10	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.
Р9	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.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, 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.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Министерство 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 14.03.02 Ядерная 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
0A5B	Моисеенко Дмитрий Витальевич

Тема работы:

Нейтронно-физический расчёт ядерного реактора типа УГР тепловой мощностью 1800 МВт	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№1550/с от 27.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	– Тип реактора: УГР – Тепловая мощность реактора: 1800 [МВт] – Ядерное горючее: UO_2 – Обогащение топлива по U-235: 4 [%] – Теплоноситель: Na – Температура теплоносителя на входе: 300 [°C] – Температура теплоносителя на выходе: 520 [°C] – Материал оболочек твэлов и кассет: сталь 1X18H9T
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	– Выбор конструктивной схемы – Расчёт «холодного» состояния реактора – Оптимизация параметров реактора – Расчёт «горячего» состояния реактора в программе WIMS-D5B – Сравнение результатов

Перечень графического материала	– Презентация – Сборочный чертеж – Спецификация
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Конотопский В.Ю.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:

1 Особенности конструкций различных типов реактора и выбор основных элементов активной зоны
2 Нейтронно-физические параметры критического стационарного ядерного реактора
3 Физический расчет реактора
4 Расчет в программе WIMS-D5B
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение
6 Социальная ответственность

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Наймушин А.Г.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Моисеенко Д.В.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A5B	Моисеенко Д.В.

Школа	ИЯТШ	Отделение	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию – 5,748 руб. за 1 кВт·ч.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	– Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Организация и планирование работ	– Расчет продолжительности этапов работ; – Построение линейного графика работ; – Расчет накопления готовности проекта.
2. Расчет сметы затрат на выполнение проекта	
3. Оценка экономической эффективности	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Линейный график работ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В. Ю.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Моисеенко Д.В.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0A5B	Моисеенко Д.В.

Школа	ИЯТШ	Отделение	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	– требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (причины, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Моисеенко Д.В.		

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Уровень образования Бакалавриат
 Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
23.04.2019	Выдача задания	
26.05.2019	Расчет критических параметров проектируемого реактора	
02.06.2019	Расчет характеристик «горячего реактора», многогрупповой нейтронно-физический расчет	
09.06.2019	Расчет эффектов реактивности	
11.06.2019	Сдача работы	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Наймушин А.Г..	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

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

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 87 с., 15 рис., 22 табл., 30 источников, 7 прил., 1 чертеж, 1 спецификация.

Ключевые слова: уран-графитовый реактор, выгорание, оксид урана, нейтронно-физический расчёт, нуклидный состав топлива.

Объектом исследования является ядерный реактор тепловой мощностью 1800 МВт с топливом UO_2 и обогащением 4 %, теплоноситель – Na.

Цель работы – определение основных нейтронно-физических характеристик реактора типа УГР тепловой мощностью 1800 МВт.

В ходе исследования произведен предварительный расчёт геометрических размеров активной зоны и скорость теплоносителя, нейтронно-физический расчёт «холодного» состояния реактора и влияние разогрева до рабочих температур на запас реактивности, расчёт «холодного» и «горячего» состояния реактора с применением программы WIMS-D5B, оценена финансовая составляющая работа и описаны внешние факторы, оказывающие влияние на исследование, а так же проведена оценка вредных и опасных факторов, связанных с выполнением данной работы.

Основные конструктивные технологические и технико-эксплуатационные характеристики: реактор типа УГР, тепловая мощность – 1800 МВт, ядерное топливо – UO_2 , обогащение 4 %, теплоноситель – вода, ТВЭЛы – стержневые с наружным охлаждением, материал оболочек ТВЭЛОВ и кассет – сталь марки 1Х18Н9Т.

Область применения: ядерная энергетика.

Обозначения и сокращения

УГР – уран-графитовый реактор

АЭС – атомная электростанция;

КМ – конструкционные материалы;

РБМК-1000 – реактор большой мощности канальный электрической мощностью 1000 МВт;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

Твэл – тепловыделяющий элемент;

ТК – технологический канал;

ТН – теплоноситель;

СУЗ – система управления и защиты;

K_{∞} – коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде;

Кэфф – коэффициент размножения нейтронов в конечной среде (эффективный коэффициент размножения нейтронов);

ТЭР – температурный эффект реактивности;

WIMS – Winfrith Improved Multigroup Scheme;

ЖМТ – жидкометаллический теплоноситель;

МЧС – министерство чрезвычайных ситуаций;

ПЭВМ – прикладная электронно-вычислительная машина;

ВЧ – высокие частоты;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ЭМП – электромагнитное поле.

Содержание

Обозначения и сокращения	13
Содержание	14
Введение	16
1 Особенности конструкций различных типов реактора и выбор основных элементов активной зоны	18
1.1 Уран-графитовые реакторы с ЖМТ	18
1.2 Конструкционные особенности уран-графитовых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем	19
2 Нейтронно-физический расчет реактора	20
2.1 Предварительный тепловой расчет	20
2.2 Физический расчет реактора	24
2.2.1 Гомогенизация	24
2.3 Расчёт ядерно-физических характеристик «холодного» реактора	25
2.4 Расчет бесконечного коэффициента размножения	29
2.4.1 Вероятность избежать резонансного захвата	29
2.4.2 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах	30
2.4.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов	31
2.4.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе	33
2.5 Расчет эффективного коэффициента размножения	33
2.6 Оптимизация	35
2.7 Расчёт нейтронно-физических параметров критического стационарного «горячего» реактора	37
2.7.1 Температурные эффекты реактивности	37
2.7.2 Зависимость поперечных сечений от температуры	38
2.7.3 Расчет эффективного коэффициента размножения «горячего» реактора	41
2.8 Расчет ядерного реактора с помощью программного обеспечения WIMS-D5	43
2.8.1 Расчет «холодного» реактора	44

2.8.2 Расчет «горячего» реактора	48
2.8.3 Расчет гомогенной ячейки.....	48
2.9 Расчет ТЭР при различных условиях эксплуатации	51
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	53
3.1 Организация и планирование работ	53
3.2 Продолжительность этапов работ	54
3.3 Расчет сметы на выполнение проекта.....	58
3.3 Расчет затрат на материалы	59
3.4 Расчет заработной платы	60
3.5 Расчет затрат на социальный налог.....	61
3.6 Расчет затрат на электроэнергию	61
3.7 Расчет амортизационных расходов	62
3.8 Расчет прочих расходов.....	63
3.9 Расчет общей себестоимости разработки	63
3.10 Расчет прибыли	64
3.11 Расчет НДС	64
3.12 Цена разработки ВКР.....	64
3.13 Оценка экономической эффективности проекта	64
Заключение	65
Список использованных источников	67
Приложение А	70
Приложение А	71
Приложение Б.....	72
Приложение В.....	73
Приложение Г	74
Приложение Д.....	75
Приложение Е.....	77
Приложение Ж.....	79

Введение

На сегодняшний день энергия, получаемая посредством деления тяжелых ядер, занимает серьезную долю всей энергии, вырабатываемой на электростанциях в России и мире. Ядерная энергетика является наиболее экологичной по сравнению с традиционной энергетикой, в которой принято сжигать органическое топливо. А также энергия, получаемая на АЭС, имеет относительно невысокую цену.

Но помимо множества плюсов, которые несет ядерная энергия, есть ряд минусов, которые нельзя упускать из виду. Одним из них является то, что резко повышается ответственность за оборудование, его расчет, создание и эксплуатацию. При штатном использовании ядерного реактора, он является безопасным для людей и окружающей среды, но существует риск непредвиденных ситуаций, которые могут повлечь за собой серьезные последствия. Поэтому особо важным является недопущение ошибок в расчетах и учет всевозможных параметров и ситуаций.

Заключение о возможности проектирования реактора, независимо от его типа, обогащения, теплоносителя, замедлителя, можно сделать только после детального как нейтронно-физического, так и теплогидравлического расчетов, включающих в себя большую базу данных о состоянии реактора в стационарном или не стационарном состоянии, что необходимо для обеспечения безопасной эксплуатации энергетической установкой.

Целью данной работы является проведение нейтронно-физического расчета реактора типа УГР тепловой мощностью 1800 МВт.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести предварительный расчет уран-графитового реактора с жидкометаллическим теплоносителем, по которому можно оценить скорость протекания жидкого натрия через активную зону;

- провести расчёт бесконечного и эффективного коэффициента размножения;
- выполнить оптимизацию элементарной ячейки для выявления наивысшего значения бесконечного коэффициента размножения;
- провести многогрупповой расчет с использованием программы WIMS и сравнить полученные результаты;
- провести расчет кинетики изменения бесконечного коэффициента размножения от энерговыработки;
- провести расчет энерговыделения и плотностей потоков быстрых и тепловых нейтронов по радиусу экспериментального канала.

1 Особенности конструкций различных типов реактора и выбор основных элементов активной зоны

1.1 Уран-графитовые реакторы с ЖМТ

В данном типе реакторов в качестве ядерного топлива используется как металлический уран, так и соединения урана с неделящимися компонентами (UO_2 , UC и тд.). В качестве замедлителя выступает графит. Данный вид реакторов привлек к себе внимание в силу известных достоинств жидкометаллических теплоносителей. К таким достоинствам жидких металлов относятся отсутствие зависимости температуры от давления, что в свою очередь присутствует у теплоносителя, представленного водой. Данный фактор позволяет создавать контура со значительно более высокими температурами при давлении на порядок ниже. Облучение жидких металлов, как правило, не вызывает в них явления, подобных радиолизу воды. Малое давление насыщенных паров и высокая термическая и радиационная стойкость выгодно отличает их от других видов теплоносителей. Один из самых значимых минусов многих жидких металлов считается малая по отношению к водяному теплоносителю объемная теплоемкость. Это вводит ограничение на аккумуляцию тепла в ЖМТ. Также многие жидкие металлы и, в частности, натрий бурно взаимодействуют с водой, что влечёт за собой усложнение тепловой схемы ЯЭУ для обеспечения должного уровня безопасности. Однако жидкометаллические теплоносители обладают более высокой теплопроводностью, что обеспечивает лучший теплоотвод от поверхности ТВЭЛ. Так же к недостаткам жидких металлов можно отнести (кроме ртути) – твердое состояния при комнатной температуре. Это требует сооружение системы подогрева для плавления металлов, что усложняет конструкцию.

1.2 Конструкционные особенности уран-графитовых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем

Активная зона реактора состоит из ячеек или модулей. Представленных шестигранной или квадратной формой. Ячейка реактора состоит из графитового замедлителя и центральной трубки рабочего канала. Внутри трубки располагается сборка тепловыделяющих элементов. Каждая сборка состоит из некоторого числа тепловыделяющих элементов стержневого типа. Тепловыделяющий элемент состоит из топливных блоков металлического или другого типа топлива. Стержень ядерного горючего покрыт защитной оболочкой из нержавеющей стали. Хороший тепловой контакт между сердечником и оболочкой достигается путем заполнения зазора жидким натрием. Ячейки (модули) шестигранной или квадратной формы представляют собой графитовые призмы, заключенные в герметизированные циркониевые оболочки для предотвращения попадания теплоносителя в графит. Между ячейками (модулями) имеется зазор, через который пропускается теплоноситель с целью снятия тепла от графита.

2 Нейтронно-физический расчет реактора

2.1 Предварительный тепловой расчет

Для выполнения предварительного расчета необходимо воспользоваться рабочими параметрами УГР, которые представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Выбранные рабочие параметры

Элемент	Значение
Толщина оболочки твэла, см	0,085
Диаметр твэла, см	1,350
Диаметр топливной таблетки, см	1,152
Диаметр отверстия в топливе, см	0,240
Число твэлов в кассете, шт.	18,000
Размер кассеты «под ключ», см	25,000
Зазор между кассетами, см	16,200
Внешний диаметр канала, см	8,800
Внутренний диаметр канала, см	8,400

В первую очередь выполняется первоначальная оценка размеров АЗ, они должны обеспечивать достаточный теплосъем при заданной мощности реактора.

Размеры АЗ определяются в соответствии с требуемой мощностью реактора следующим образом:

$$V_{a.3} = \frac{N}{N_0} \eta, \text{ см}^3; \quad (2.1)$$

$$D_{a.3} = \sqrt[3]{\frac{4V_{a.3}}{\pi m}}, \text{ см}; \quad (2.2)$$

$$H_{a.3} = m D_{a.3}, \text{ см}, \quad (2.3)$$

где $V_{a.3}, D_{a.3}, H_{a.3}$ – объем, диаметр и высота активной зоны;

m – отношение высоты к диаметру;

N – заданная тепловая мощность реактора, МВт;

η – коэффициент, учитывающий увеличение объема реактора.

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

$$N_{0_{\max}} = \overline{N_0} \cdot K_v, \text{ Вт/см}^3, \quad (2.4)$$

где K_v – объемный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

$\overline{N_0}$ – средняя удельная объемная нагрузка, Вт/см³.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{яч}}{116 \cdot \Pi_0}, \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (2.5)$$

где Π_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛа, см;

$S_{яч}$ – площадь сечения элементарной ячейки, см².

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

$$v = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{a.з}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{mn}}, \text{ м/с}, \quad (2.6)$$

где v – скорость прокачки теплоносителя;

K_z – осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов, см²;

S_{mn} – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на тепловыделяющую сборку, см²;

ρ – плотность теплоносителя при рабочих параметрах, г/см³;

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

Для определения используется следующая формула:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}), \text{ ккал/кг}, \quad (2.7)$$

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

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

Таблица 2.2 – Выбранные расчетные параметры

Параметры	
Заданная тепловая мощность, МВт	1800
Среднеинтегральное значение мощности, Вт/см ³	9,00
Коэффициент увеличения активной зоны	1,20
Отношение высоты к диаметру	0,95
Объемный коэффициент неравномерности	2,50
Осевой коэффициент неравномерности	1,35

Объем активной зоны:

$$V_{a.z} = \frac{N}{N_0} \eta = \frac{180 \cdot 10^7}{9} \cdot 1,2 = 24 \cdot 10^7 \text{ см}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{a.z} = \sqrt[3]{\frac{4V_{a.z}}{\pi m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 24 \cdot 10^7}{3,14 \cdot 0,95}} = 685,17 \text{ см.}$$

Высота активной зоны:

$$H_{a.z} = mD_{a.z} = 0,95 \cdot 685,17 = 650,91 \text{ см.}$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\max}} = \overline{N_0} \cdot K_v = 9 \cdot 2,5 = 22,5 \text{ Вт/см}^3.$$

Производится подсчет периметров всех тепловыделяющих элементов по площади элементарной ячейки и в канале. Эти величины позволяют определить максимально допустимую тепловую нагрузку.

Периметр тепловыделяющих элементов:

$$P_0 = \pi \cdot d \cdot n = 3,14 \cdot 1,35 \cdot 18 = 76,34 \text{ см.}$$

Форма элементарной ячейки – квадрат. Её площадь находится по следующей формуле:

$$S_{яч} = a^2 = 25^2 = 625 \text{ см}^2.$$

Тогда, максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0_{\max}} \cdot S_{яч}}{116 \cdot P_0} = \frac{22,5 \cdot 625}{116 \cdot 76,34} = 1,59 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Расчёт скорости прокачки теплоносителя вызывает необходимость определить площадь, занимаемую теплоносителем и разность теплосодержания теплоносителя на выходе.

Площадь канала:

$$S_{\text{кан}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 8,8^2}{4} = 60,79 \text{ см}^2.$$

Площадь, приходящаяся на твэлы:

$$S_{\text{твэлов}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 1,35^2}{4} \cdot 18 = 25,76 \text{ см}^2.$$

Площадь теплоносителя:

$$S_{\text{тн}} = S_{\text{кан}} - S_{\text{твэлов}} = 29,65 \text{ см}^2. \quad :$$

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,328 \cdot (520 - 300) = 292,16 \text{ ккал/кг}.$$

Тогда скорость прокачки теплоносителя:

$$v = \frac{q_{\text{max}} \cdot P_0 \cdot H_{\text{а.з}}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{тн}}} = \frac{1,59 \cdot 76,34 \cdot 650,91}{3,6 \cdot 1,35 \cdot 0,897 \cdot 292,16 \cdot 29,65} = 2,01 \text{ м/с}.$$

Все полученные результаты в ходе проведения предварительного расчета представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты предварительного расчета

Параметр	Значение
Объем АЗ, см ³	24·10 ⁷
Диаметр АЗ, см	685,17
Высота АЗ, см	650,91
Максимальная удельная объемная нагрузка, Вт/см ³	22,50
Максимально допустимая тепловая нагрузка, Гкал/м ² ·ч	1,59
Скорость прокачки ТН, м/с	2,01

Такие параметры как: шаг решётки, размеры канала, твэла скорость прокачки теплоносителя и площадь сечения теплоносителя в дальнейшем физическом расчёте уточняются и корректируются.

2.2 Физический расчет реактора

2.2.1 Гомогенизация

Реальная ячейка, содержащая замедлитель, сборку твэл, теплоноситель, оболочку канала, заменяется эквивалентной-двузонной в которой имеется гомогенизированный блок замедлителя и фиктивный блок. Что представляет собой блок, полученный посредством проведения гомогенизации всех зон канала, то есть: ядерным горючим, конструкционными материалами и теплоносителем. На рисунке 2.1 представлены способ приведения многозонной ячейки к двузонной.

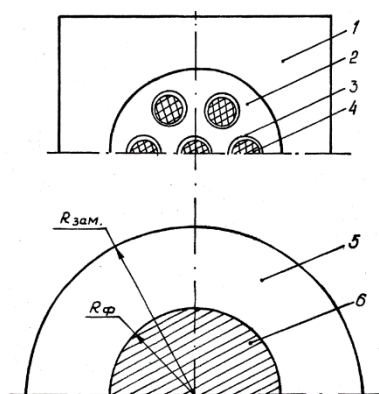


Рисунок 2.1 – Способ приведения многозонной ячейки к двузонной:

1–замедлитель; 2 – теплоноситель; 3– оболочка твэл; 4–твэл; 5– блок замедлителя; 5– фиктивный блок.

Необходимо определить площади, занимаемые компонентами для дальнейшего вычисления бесконечного коэффициента размножения:

$$S_{\phi} = \pi \cdot \frac{D_{\text{кан}}^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{8,8^2}{4} = 60,82 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{зам}} = S_{\text{яч}} - S_{\phi} = 625 - 60,82 = 564,18 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{твэл}} = \pi \cdot \frac{D_{\text{твэл}}^2}{4} \cdot n = 3,14 \cdot \frac{1,35^2}{4} \cdot 18 = 25,76 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{мон}} = \pi \cdot (R_{\text{мон}}^2 - R_{\text{отв}}^2) \cdot n = 3,14 \cdot (0,576^2 - 0,12^2) \cdot 18 = 17,95 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{He}} = \pi \cdot (R_{\text{отв}}^2 + R_{\text{вн.твэл}}^2 - R_{\text{мон}}^2) \cdot n = 3,14 \cdot (0,12^2 + 0,59^2 - 0,576^2) \cdot 18 = 1,73 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{сталь}} = \pi \cdot (R_{\text{внеш.твэл}}^2 - R_{\text{внут.твэл}}^2 + R_{\text{внеш.кан}}^2 - R_{\text{внут.кан}}^2) \cdot n =$$

$$= 3,14 \cdot (0,675^2 - 0,59^2 + 4,4^2 - 4,2^2) \cdot 18 = 11,48 \text{ см}^2;$$

Весь перечень гомогенизированных констант представлен в приложении Б.

2.3 Расчёт ядерно-физических характеристик «холодного» реактора

Для каждого из материалов зоны топлива, оболочки, теплоносителя и замедлителя обязателен расчёт нейтронно-физических характеристик, а именно сечений взаимодействия, замедляющих свойств и других. Данная необходимость вызвана различными параметрами взаимодействия с нейтронами всех элементов. При выполнении холодного расчёта температура принимается равной 20 °С.

Ядерная концентрация для каждого элемента находится по формуле:

$$N = \frac{N_A \cdot \rho}{A}, \text{ молекул/см}^3, \quad (2.8)$$

где N_A – постоянная Авогадро, моль⁻¹;

ρ – весовая концентрация элемента, г/см³;

A – атомный вес элемента, г/моль.

Результаты расчета представлены в приложении Б. Ниже представлен расчет концентрации ядерного топлива:

– концентрация U:

$$N_{UO_2} = \frac{N_A \cdot \rho_{UO_2}}{A_{UO_2}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,97}{270} = 2,45 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

– концентрация U²³⁵:

$$N_{U^{235}} = N_{UO_2} \cdot \omega = 2,45 \cdot 10^{22} \cdot 0,04 = 9,78 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3},$$

где ω – обогащение по U²³⁵.

– концентрация U²³⁸:

$$N_{U^{238}} = N_{UO_2} \cdot (1 - \omega) = 2,45 \cdot 10^{22} \cdot (1 - 0,04) = 2,35 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

– концентрация O:

$$N_O = 2 \cdot N_{UO_2} = 4,89 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

С помощью следующих формул определяются сечения деления и поглощения, отнесенные к средней скорости тепловых нейтронов:

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_{f_0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}; \quad (2.9)$$

$$\bar{\sigma}_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}; \quad (2.10)$$

где σ_a, σ_f – табличные значения сечений, барн;

f_a, f_f – поправочный коэффициент f , учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона $1/v^2$;

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

Величина нейтронного газа принята $T_{н.г} = 400$ К. Поправочные коэффициенты для этой температуры соответственно: $f_f = 0,96$ и $f_a = 0,96$ для делящихся нуклидов и $f_a = 1$ для неделящихся нуклидов.

Макроскопические сечения вычисляются по формуле:

$$\Sigma_i = N_i \cdot \sigma_i, \text{ см}^{-1}. \quad (2.11)$$

Ниже представлен расчет микроскопических и макроскопических сечений для топлива. Остальные результаты приведены в приложении А.

Микросечения для U^{235} :

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 496,07 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 422,71 \text{ барн};$$

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

$$\sigma_{tr}^{U^{235}} = \sigma_a^{U^{235}} + \sigma_s^{U^{235}} (1 - \mu_s) = 496,07 + 15(1 - 0) = 511,07 \text{ барн}.$$

Микросечения для U^{238} :

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 1,96 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{U^{238}} = 9 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{U^{238}} = \sigma_a^{U^{238}} + \sigma_s^{U^{238}} (1 - \mu_s) = 1,96 + 9(1 - 0) = 10,96 \text{ барн}.$$

Микросечения для С:

$$\sigma_s^C = 3,75 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^C = \sigma_a^C + \sigma_s^C (1 - \mu_s) = 0 + 4,7(1 - 0,04) = 3,6 \text{ барн}.$$

Макросечения для U^{235} :

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 422,71 \cdot 10^{-24} \cdot 1,15 \cdot 10^{21} = 0,414 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 496,07 \cdot 10^{-24} \cdot 1,15 \cdot 10^{21} = 0,485 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 1,15 \cdot 10^{21} = 0,0147 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 511,07 \cdot 10^{-24} \cdot 1,15 \cdot 10^{21} = 0,500 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для U^{238} :

$$\Sigma_a^{U^{238}} = 1,96 \cdot 10^{-24} \cdot 3,17 \cdot 10^{22} = 0,0462 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{238}} = 9 \cdot 10^{-24} \cdot 3,17 \cdot 10^{22} = 0,211 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{238}} = 10,96 \cdot 10^{-24} \cdot 3,17 \cdot 10^{22} = 0,258 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для O_2 :

$$\Sigma_s^{O_2} = 4,7 \cdot 10^{-24} \cdot 3,284 \cdot 10^{22} = 0,183 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{O_2} = 4,42 \cdot 10^{-24} \cdot 3,284 \cdot 10^{22} = 0,176 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для UO_2 :

$$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U^{235}} + \Sigma_a^{U^{238}} + \Sigma_a^{O_2} = 0,532 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{UO_2} = \Sigma_f^{U^{235}} = 0,414 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{UO_2} = \Sigma_s^{U^{235}} + \Sigma_s^{U^{238}} + \Sigma_s^{O_2} = 0,409 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{UO_2} = \Sigma_{tr}^{U^{235}} + \Sigma_{tr}^{U^{238}} + \Sigma_{tr}^{O_2} = 0,933 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность находятся по формулам, представленным ниже:

$$\xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}}; \quad (2.12)$$

$$\xi \Sigma_s = \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \cdot \Sigma_s, \text{ см}^{-1}. \quad (2.13)$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для U^{235} :

$$\xi^{U^{235}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 8,49 \cdot 10^{-3};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0147 = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для U^{238} :

$$\xi^{U^{238}} = \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 8,38 \cdot 10^{-3};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{238}} = 8,38 \cdot 10^{-3} \cdot 0,211 = 0,00177 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для С:

$$\xi^O = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0,120;$$

$$\xi \Sigma_s^O = 0,120 \cdot 0,183 = 0,0220 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для UO_2 :

$$\xi^{UO_2} = \frac{\sum \xi \Sigma}{\sum \Sigma} = \frac{\xi \Sigma^{U^{235}} + \xi \Sigma^{U^{238}} + \xi \Sigma^C}{\Sigma^{U^{235}} + \Sigma^{U^{238}} + \Sigma^C} = 0,0584;$$

$$\xi \Sigma_s^{UO_2} = 0,0584 \cdot 0,409 = 0,0239 \text{ см}^{-1}.$$

2.4 Расчет бесконечного коэффициента размножения

Расчёт коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде выполняется при помощи формулы четырех сомножителей приведенной ниже:

$$k_{\infty} = \varphi \cdot \mu \cdot \theta \cdot \eta, \quad (2.14)$$

где φ – вероятность избежать резонансного захвата;
 μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;
 θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;
 η – число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе.

2.4.1 Вероятность избежать резонансного захвата

Резонансный захват нейтронов происходит ядрами U^{238} . Вероятность избежать нейтронами резонансного захвата рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{k_T \cdot R_{UC} \cdot \sqrt{R_{\text{мэл}} \cdot n \cdot \varepsilon + 0,73 \cdot n \cdot R_{UC}^2 \cdot \varepsilon}}{\xi \Sigma_{s_{\text{зам}}} \cdot S_{\text{зам}} + \xi \Sigma_{s_{\phi}} \cdot S_{\phi}}\right), \quad (2.15)$$

где k_T – температурный коэффициент;
 ε – пористость по U^{238} .

Температурный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot \sqrt{T_U}), \quad (2.16)$$

где T_U – температура топлива.

Пористость по U^{238} определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{N^{U^{238}}}{N_0^{U^{238}}}, \quad (2.17)$$

где $N_0^{U^{238}}$ – концентрация U^{238} в природном уране;
 $N^{U^{238}}$ – концентрация U^{238} в топливе.

Температурный коэффициент:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 0,001 \cdot \sqrt{400}) = 1,04625.$$

Пористость по U^{238} :

$$\varepsilon = \frac{2,35 \cdot 10^{22} \cdot 238}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,993 \cdot 18,7} = 0,5.$$

Тогда вероятность избежать резонансного захвата:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{1,04625 \cdot 0,576 \cdot \sqrt{0,675 \cdot 18 \cdot 0,5} + 0,73 \cdot 18 \cdot 0,576^2 \cdot 0,5}{0,0614 \cdot 564,18 + 0,0153 \cdot 60,82}\right) = 0,902.$$

2.4.2 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах

Для гетерогенного реактора величина μ зависима от геометрических параметров, формы и местоположения топливного блока, а также от диффузионных особенностей топливного блока. При расчете μ для стержневых ТВЭЛ можно воспользоваться формулой:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P}, \quad (2.18)$$

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

Значение P определяется по рисунку 2.2:

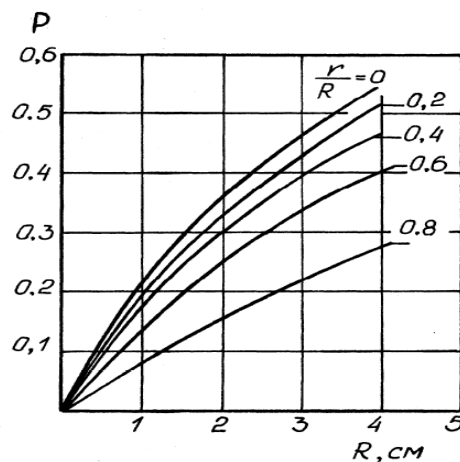


Рисунок 2.2 – График вероятности столкновения быстрого нейтрона с ядром U^{238}

При соотношении $\frac{r}{R} = 0,2$ и радиусе топлива 0,576 см, величина $P=0,1$.

Тогда коэффициент размножения на быстрых нейтронах:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} = 1,00971.$$

2.4.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов

Расчет θ проводится последовательно в два действия. В первую очередь рассчитывается θ'_ϕ – это отношение, показывающее долю тепловых нейтронов поглощенных в фиктивном блоке к числу всех поглощенных тепловых нейтронов. Затем определяется второй множитель θ_0 – это коэффициент, отвечающий за использование тепловых нейтронов исключительно внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{a_{\text{мон}}}}{\Sigma_{a_\phi}}. \quad (2.19)$$

Величина отношения числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, определяется по формуле:

$$\frac{1}{\theta'_\phi} = 1 + F \cdot \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_{a_{\text{зам}}}}{S_\phi \cdot \Sigma_{a_\phi}} + (E - 1), \quad (2.20)$$

где F – коэффициент экранирования;

$(E - 1)$ – фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе.

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования равен:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_\phi}{L_\phi} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}{I_1\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}, \quad (2.21)$$

где I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков;

L_ϕ – длина диффузии в фиктивном блоке.

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{зам}}{L_{\phi}} - 0,75 \right). \quad (2.22)$$

Длина диффузии определяется по формуле:

$$L_{diff} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr} \cdot \Sigma_a}}. \quad (2.23)$$

Тогда длина диффузии в фиктивном блоке и блоке замедлителя:

$$L_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr_{\phi}} \cdot \Sigma_{a_{\phi}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,5 \cdot 0,199}} = 1,83 \text{ см};$$

$$L_{зам} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr_{\phi}} \cdot \Sigma_{a_{\phi}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,366 \cdot 2,4 \cdot 10^{-4}}} = 61,60 \text{ см}.$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{зам}}{L_{\phi}} - 0,75 \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{14,1}{61,60} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{14,1}{1,83} - 0,75 \right) = 0,0338.$$

Коэффициент экранирования:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}}\right)}{I_1\left(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}}\right)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4,4}{1,83} \cdot \frac{I_0\left(\frac{4,4}{1,83}\right)}{I_1\left(\frac{4,4}{1,83}\right)} = 1,59.$$

Тогда величина отношения числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке:

$$\frac{1}{\theta'_{\phi}} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \Sigma_{a_{зам}}}{S_{\phi} \cdot \Sigma_{a_{\phi}}} + (E-1) = 1 + 1,59 \cdot \frac{564,18 \cdot 0,00024}{60,82 \cdot 0,229} + 0,0338;$$

$$\theta'_{\phi} = 0,951.$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{a_{мон}}}{\Sigma_{a_{\phi}}} = \frac{0,157}{0,199} = 0,788.$$

Тогда коэффициент использования тепловых нейтронов:

$$\theta = \theta_0 \cdot \theta'_\phi = 0,788 \cdot 0,951 = 0,749.$$

2.4.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе

η показывает выход вторичных нейтронов, приходящихся на один тепловой нейтрон, поглощенный топливом и вызвавший деление. Рассчитывается по формуле:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\sum f_{mon}}{\sum a_{mon}}, \quad (2.24)$$

где ν_f – число нейтронов, испускаемое при одном акте деления.

Тогда:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\sum f_{mon}}{\sum a_{mon}} = 2,42 \cdot \frac{0,414}{0,532} = 1,88.$$

Тогда коэффициент размножения в бесконечной среде:

$$k_\infty = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta = 1,00971 \cdot 0,902 \cdot 0,749 \cdot 1,88 = 1,29.$$

2.5 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения нейтронов находится по формуле:

$$k_{эфф} = k_\infty \cdot P = k_\infty \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2}, \quad (2.25)$$

где B^2 – геометрический параметр;

τ_p – возраст нейтронов;

P – вероятность избежать утечки.

Квадрат длины диффузии отражателя с учетом гетерогенности:

$$L^2 = L_{зам}^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{1}{F}\right) \cdot S_{яч}}{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{\Sigma_{tr}^\phi}{\Sigma_{tr}^{зам}}\right) \cdot S_{зам}} \cdot (1 - \theta'_\phi). \quad (2.26)$$

Возраст нейтронов с учётом всех элементов ячейки:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^2. \quad (2.27)$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta} \right)^2, \quad (2.28)$$

где δ – эффективная добавка за счет отражателя.

Эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 1,2 \cdot L_{omp} \cdot th \frac{T}{L_{omp}}, \quad (2.29)$$

где T – толщина отражателя.

Толщина отражателя:

$$T = 1,5 \cdot M, \quad (2.30)$$

где M – длина миграции нейтронов в отражателе.

Длина миграции:

$$M = \sqrt{L^2 + \tau_p}. \quad (2.31)$$

Тогда квадрат длины диффузии отражателя:

$$\begin{aligned} L^2 &= L_{зам}^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{1}{F}\right) \cdot S_{яч}}{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{\Sigma_{tr}^\phi}{\Sigma_{tr}^{зам}}\right) \cdot S_{зам}} \cdot (1 - \theta'_\phi) = \\ &= 61,60^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{60,82}{564,18} \cdot \frac{1}{1,59}\right) \cdot 625}{\left(1 + \frac{60,82}{564,18} \cdot \frac{0,5}{0,366}\right) \cdot 564,18} \cdot (1 - 0,951) = 192 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Возраст нейтронов:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^2 = 352 \cdot \left(\frac{625}{564,18} \right)^2 = 431,98 \text{ см}^2.$$

Длина миграции:

$$M = \sqrt{192 + 431,98} = 24,98 \text{ см.}$$

Толщина отражателя:

$$T = 1,5 \cdot M = 1,5 \cdot 24,96 = 37,47 \text{ см.}$$

Тогда эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 1,2 \cdot L_{отр} \cdot th \frac{T}{L_{отр}} = 1,2 \cdot 13,86 \cdot th \frac{37,47}{13,86} = 16,5 \text{ см.}$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta} \right)^2 = \left(\frac{\pi}{651 + 2 \cdot 16,5} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{343 + 16,5} \right)^2 = 6,6 \cdot 10^{-5}.$$

Тогда эффективный коэффициент размножения:

$$k_{эфф} = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2} = 1,3 \cdot \frac{\exp(-6,6 \cdot 10^{-5} \cdot 431,98)}{1 + 6,6 \cdot 10^{-5} \cdot 192} = 1,23.$$

2.6 Оптимизация

Оптимизация заключается в подборе размера ячейки $h_{яч}$, радиуса канала $R_{кан}$ и радиуса твэл $R_{твэл}$ с расчетом повышения значения бесконечного коэффициента размножения.

Таблица 2.4 – Зависимость бесконечного коэффициента размножения и скорости теплоносителя от размера ячейки.

Размер ячейки, см	Бесконечный коэффициент размножения	Скорость теплоносителя, м/с
15	1,0654	0,7254
17	1,1574	0,9318
19	1,2112	1,1639
21	1,2509	1,4219
23	1,2743	1,7056
25	1,2922	2,0152

Продолжение таблицы 2.4

27	1,2978	2,3505
29	1,2968	2,7116
31	1,2929	3,0982
33	1,2846	3,5113
35	1,2731	3,9498
37	1,2592	4,4141
39	1,2419	4,9042
41	1,2311	5,4201

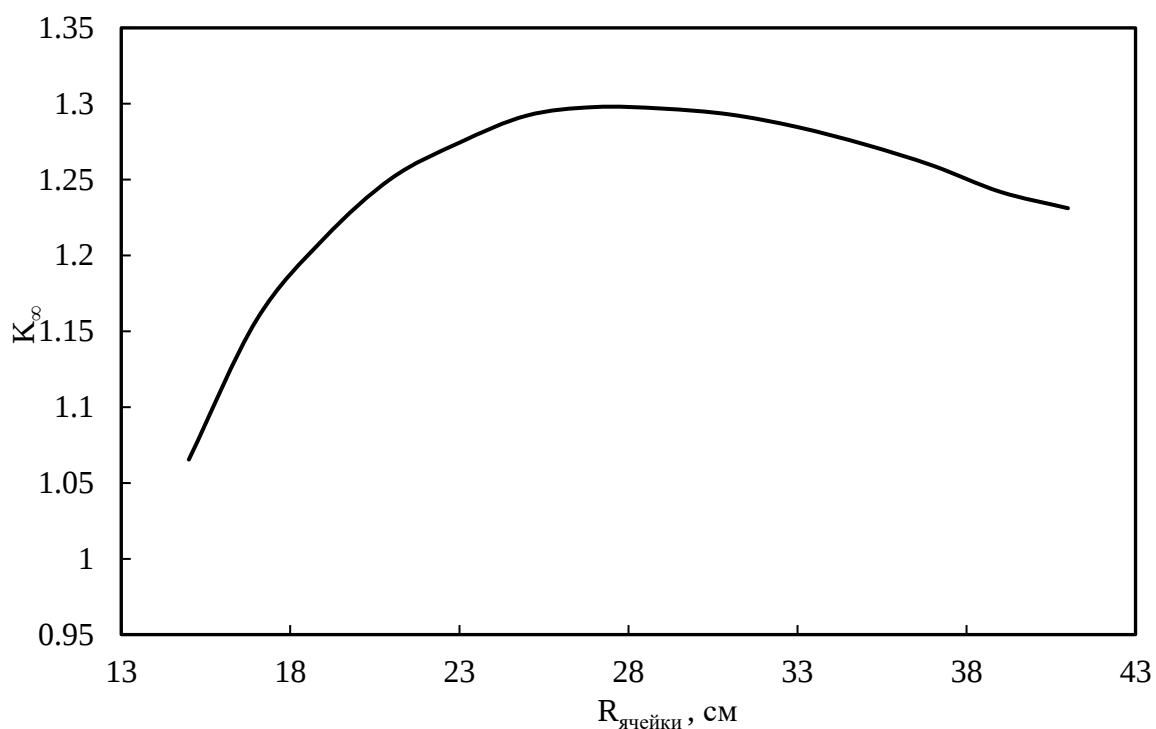


Рисунок 2.3– Зависимость бесконечного коэффициента размножения от размера ячейки

Из графика наибольшее значение бесконечного коэффициента размножения наблюдается при размере ячейки равном 27 см, при этом скорость прокачки теплоносителя составляет 2,3505 м/с а бесконечный коэффициент размножения 1,29.

Таблица 2.5 – Зависимость бесконечного коэффициента размножения и скорости теплоносителя от размера топливной таблетки.

Радиус топлива, см	Бесконечный коэффициент размножения	Скорость теплоносителя, м/с
0,8	1,1100	1,945
0,9	1,1900	2,095

Продолжение таблицы 2.5

1	1,2400	2,289
1,1	1,2800	2,544
1,2	1,3000	2,893
1,3	1,3200	3,930
1,4	1,3325	4,160
1,4	1,3325	4,160
1,5	1,3355	5,480
1,6	1,3315	8,270

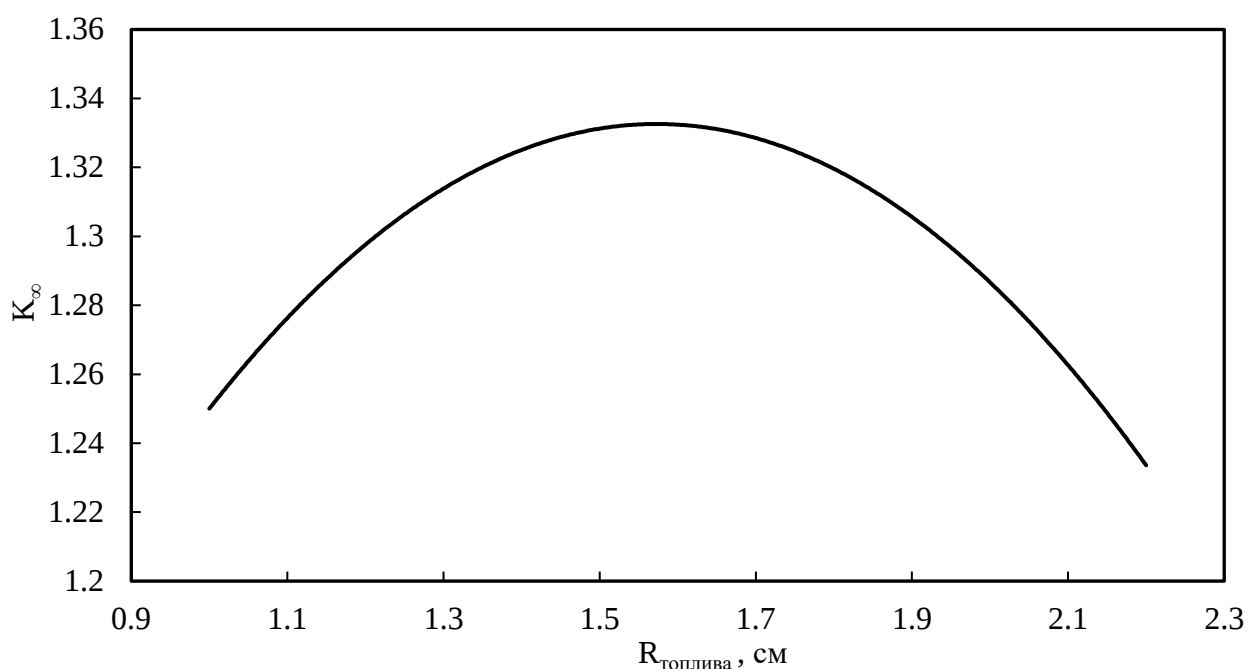


Рисунок 2.4– Зависимость бесконечного коэффициента размножения от размера канала.

Из графика наибольшее значение бесконечного коэффициента размножения наблюдается при радиусе топливной таблетки равном 0,75 см, при этом бесконечный коэффициент размножения 1,33.

2.7 Расчёт нейтронно-физических параметров критического стационарного «горячего» реактора

2.7.1 Температурные эффекты реактивности

Работа реактора приводит к значительному разогреву и как следствию увеличению температуры каждого материала АЗ, отражателя, а также конструкционных материалов.

Рост температуры влечёт за собой повышение температуры нейтронного газа, что в свою очередь вызывает уменьшение сечения поглощения, а также сечения деления нейтронов теплового спектра. Приращение температуры вызывает расширение материалов, что равносильно уменьшению их плотности, этот факт равносильно падению количества ядер в объеме вещества. Вследствие прямо пропорциональной связи происходит уменьшение макросечений.

Для ядерного горючего также наблюдается изменение температуры – это приводит к уширению резонансов вызванным их тепловым движением.

2.7.2 Зависимость поперечных сечений от температуры

Для установления температурных эффектов реактивности, необходимо ввести температуру нейтронного газа при заданной рабочей температуре. А также высчитать сопутствующие ей «горячие» значения сечений, а также ряда иных параметров. Точность расчёта позволяет принять среднюю температуру замедлителя эквивалентной средней температуре теплоносителя. Эффективная температура нейтронного газа вычисляется по формуле:

$$T_{н.г.} = T_{зам} \left(1 + 1,4 \frac{\Sigma_{a_{яч}}}{\xi \Sigma_{s_{яч}}} \right) ^{\circ} K, \quad (4.1.1.1)$$

где
$$T_{зам} = \frac{T_{ТНвхл} + T_{ТНвх}}{2} = \frac{792,15 + 573,15}{2} = 683,15^{\circ} K,$$

Сечения $\Sigma_{a_{яч}}$ и $\xi \Sigma_{s_{яч}}$ берутся при температуре замедлителя. Замедляющая способность определяется простым усреднением, однако, при расчете макросечения поглощения ячейки необходимо учитывать блок эффект.

$$\xi \Sigma_{s_{яч}} = \frac{\xi \Sigma_{s_{зам}} S_{зам} + \xi \Sigma_{s_{топл}} S_{топл} + \xi \Sigma_{s_{ТН}} S_{ТН} + \xi \Sigma_{s_{КМ}} S_{КМ}}{S_{яч}} = 0,0456 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{a_{яч}} = \frac{\Sigma_{a_{зам}} S_{зам} + \frac{1}{F} (\Sigma_{a_{топл}} S_{топл} + \Sigma_{a_{ТН}} S_{ТН} + \Sigma_{a_{КМ}} S_{КМ})}{S_{зам} + \frac{1}{F} (S_{топл} + S_{ТН} + S_{КМ})} = 0,0099 \text{ см}^{-1},$$

$$\frac{\Sigma_{a_{яч}}}{\xi \Sigma_{s_{яч}}} = 0,218.$$

Тогда температура нейтронного газа при рабочей температуре равна:

$$T_{н.г.} = T_{зам} \left(1 + 1,4 \frac{\Sigma_{a_{яч}}}{\xi \Sigma_{s_{яч}}} \right) = 683,15 \left(1 + 1,4 \frac{0,0099}{0,0456} \right) = 892^\circ K.$$

Сечения при температуре нейтронного газа определяются следующим образом:

$$\bar{\sigma}_a(T_{н.г.}) = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot F(\chi_{zp}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}. \quad (2.32)$$

где σ_a – микроскопическое сечение поглощения стандартных нейтронов;
 f_a – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона $1/v^2$;

$T_{н.г.}$ – температура нейтронного газа;

$$\frac{\Sigma_{a_{яч}}}{\xi \Sigma_{s_{яч}}} = \frac{\chi_{zp}^2 \cdot e^{-\chi_{zp}}}{1 - (1 + \chi_{zp}) \cdot e^{-\chi_{zp}}} = F(\chi_{zp}), \quad (2.33)$$

где $\chi_{гр}$ – верхняя граница тепловой группы;
 $\chi_{гр}$ – определяется из вышеназванного уравнения подбором.

Подбор был осуществлен с помощью MS Excel и полученное значение $\chi_{гр}$ приблизительно равно 4,69. Коэффициенты $f_a(T_{н.г.}), F(\chi_{zp})$ находятся по значению $\chi_{гр}$ из графиков на рисунке 2.5.

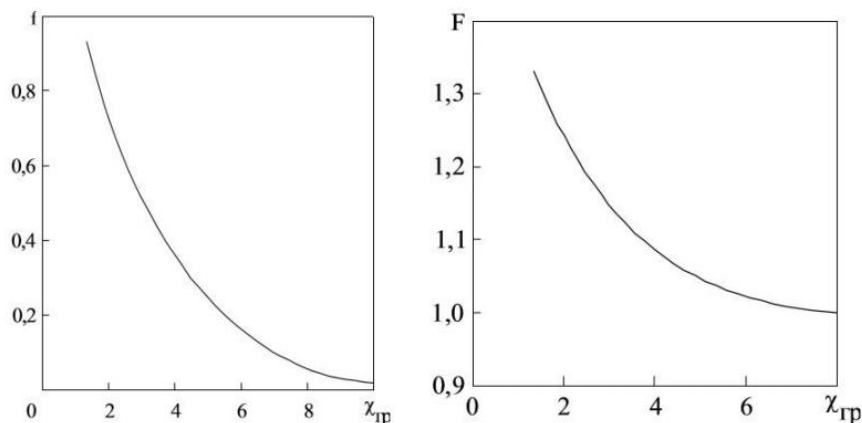


Рисунок 2.5– зависимость коэффициентов $f_a(T_{н.з.})$, $F(\chi_{zp})\chi$ от $\chi_{гр}$

Примем значения $f_a(T_{н.з.}) = 0,05$ $F(\chi_{zp}) = 1$. Тогда формула для пересчета сечений примет следующий вид:

$$\bar{\sigma}_a(T_{н.з.}) = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot 0,932 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.з.}}} \quad (2.34)$$

Сечения деления пересчитываются аналогичным образом. Значения микроскопических и макроскопических сечений при рабочей температуре приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – микроскопические и макроскопические сечения поглощения и деления при рабочей температуре

Материал	Микроскопическое сечение		Макроскопическое сечение	
	σ_f , барн	σ_a , барн	Σ_f , см ⁻¹	Σ_a , см ⁻¹
U ₂₃₅	277,315	325,440	0,319	0,373845
U ₂₃₈	0	1,291	0	0,040898
C(топл)	0	0,002	0	6,26E-05
Na	0	0,268	0	0,005964
Fe	0	1,293	0	0,074613
Cr	0	1,477	0	0,024134
Ni	0	2,192	0	0,020733
C(зам)	0	0,002	0	0,000158
Ti	0	2,965	0	0,0020399
Mn	0	6,799	0	0,011695
C(сталь)	0	0,002	0	1,97E-07

2.7.3 Расчет эффективного коэффициента размножения «горячего» реактора.

Эффективный коэффициент размножения для горячего реактора вычисляется следующим образом

$$k_{эфф}^{гор} = k_{\infty}^{гор} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau^{гор})}{1 + B^2 L_{гор}^2}, \quad (2.35)$$

$$\tau^{гор} = \tau^{хол} - \frac{1}{3 \cdot \xi \Sigma_{s_{яч}} \cdot \Sigma_{tr_{яч}}} \ln \frac{T_{н.г.}}{T_0} \text{ см}^2, \quad (2.36)$$

где $T_0 = 293 \text{ °K}$,

$$\tau^{гор} = 412 \text{ см}^2.$$

Квадрат длины диффузии для решетки гетерогенного реактора, находящегося в рабочем состоянии, рассчитывается так же, как и для холодного реактора. Зависимость квадрата длины диффузии замедлителя от температуры можно вычислить по следующей формуле:

$$L_{зам}^2(T) = L_{зам}^2(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,48} \text{ см}^2. \quad (2.37)$$

Опыт показывает, что целесообразно поддерживать температуру графитовой кладки в пределах 673 – 973 К. Примем температуру графитовой кладки $T = 732 \text{ К}$, тогда:

$$L_{зам}^2(T) = L_{зам}^2(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,48} = 61,61^2 \left(\frac{892}{293} \right)^{0,48} = 6476 \text{ см}^2.$$

Пересчитаем квадрат длины диффузии для решетки гетерогенного реактора:

$$L^2 = L_{зам}^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{1}{F}\right) \cdot S_{яч}}{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{\Sigma_{тр}^\phi}{\Sigma_{тр}^{зам}}\right) \cdot S_{зам}} \cdot (1 - \theta'_\phi) =$$

$$= 6476 \cdot \frac{\left(1 + \frac{60,82}{564,18} \cdot \frac{1}{1,02}\right) \cdot 625}{\left(1 + \frac{60,82}{564,18} \cdot \frac{0,439}{0,298}\right) \cdot 564,18} \cdot (1 - 0,953) = 253 \text{ см}^2.$$

Длина миграции:

$$M = \sqrt{253 + 412} = 25,78 \text{ см.}$$

Толщина отражателя:

$$T = 1,5 \cdot M = 1,5 \cdot 25,78 = 38,62 \text{ см.}$$

Эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 1,2 \cdot L_{omp} \cdot th \frac{T}{L_{omp}} = 1,2 \cdot 253 \cdot th \frac{38,68}{253} = 18,8 \text{ см.}$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{302,18 + 2 \cdot 18,8}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{159,04 + 18,8}\right)^2 = 6,51 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}.$$

Коэффициенты в формуле четырех сомножителей были пересчитаны средствами MS Excel и приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – коэффициенты формулы четырех сомножителей

Коэффициент	В «холодном» реакторе	В «горячем» реакторе	Изменение параметра
η	1,8800	1,8800	0
θ	0,7490	0,7630	0,014
μ	1,0097	1,0097	0
ϕ	0,9020	0,9020	0,0002
k_∞	1,29	1,31	0,02

Эффективный коэффициент размножения «горячего» реактора, с учетом вышеуказанных новых параметров, равен:

$$k_{эфф}^{zop} = k_{\infty}^{zop} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau^{zop})}{1 + B^2 L_{zop}^2} = 1,34 \cdot \frac{\exp(-6,51 \cdot 10^{-5} \cdot 412)}{1 + 6,51 \cdot 10^{-5} \cdot 93,5} = 1,253.$$

По сравнению с «холодным» состоянием реактора, эффективный коэффициент размножения увеличился на 0,023, что свидетельствует о том, что ТЭР данного реактора положительный.

Определим температурный коэффициент реактивности:

$$\alpha = \frac{\Delta K_{эфф}}{\Delta T} = \frac{1,253 - 1,23}{862 - 400} = 0,000049 \text{ K}^{-1}.$$

Температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \rho^{zop} - \rho^{хол} = 0,2019 - 0,1869 = 0,015.$$

Наличие положительного температурного эффекта приводит к увеличению эффективного коэффициента размножения при нагреве реактора, что может навредить устойчивой работе реактора.

2.8 Расчет ядерного реактора с помощью программного обеспечения WIMS-D5

Для того, чтобы убедиться в правильности расчетов реактора было решено воспользоваться программным обеспечением WIMS-D5. Эта программа позволяет с большой точностью рассчитывать параметры ядерного реактора. В основе лежит решение многогрупповых уравнений, причем количество групп указывается вручную.

2.8.1 Расчет «холодного» реактора

В приложении В представлен код, содержащий в себе входные данные, предоставляемые программе для расчета «холодного» реактора, такие как: количество групп нейтронов (в нашем случае произведена свертка в 4 группы), оптимизированные радиусы зон материалов (поскольку в WIMS-е ячейка представляет собой слоистый цилиндр), температуры топлива, конструкционных материалов, теплоносителя и замедлителя, концентрации. За элементарную ячейку был принят экспериментальный канал.

В созданной расчетной модели элементарной ячейки реактора рассчитаем кинетику изменения K_{∞} в зависимости от глубины выгорания. Для этого была задана мощность реактора 26,85 МВт/т(U) и задан произвольный шаг расчета (по времени). Полученные результаты представлены в таблице 2.8. На основе этих результатов построен график зависимости реактивности от энерговыработки, который представлен на рисунке 2.8

Таблица 2.8 – результаты расчета холодного реактора

t, сут	Q, МВт·сут/Т(U)	K_{∞}	ρ
1	26,85	1,159673	0,1276
2	53,70	1,130847	0,1057
3	80,55	1,130050	0,1050
6	161,10	1,129458	0,1046
9	241,65	1,127731	0,1032
12	322,20	1,126137	0,1020
18	483,30	1,124722	0,1008
24	644,40	1,122387	0,0990
30	805,50	1,120509	0,0975
36	966,60	1,118923	0,0962

Продолжение таблицы 2.9

46	1235,10	1,117502	0,0951
56	1503,60	1,115319	0,0933
71	1906,35	1,113222	0,0917
90	2416,50	1,110069	0,0891
109	2926,65	1,105972	0,0858
159	4269,15	1,101746	0,0823
209	5611,65	1,090231	0,0727
259	6954,15	1,078486	0,0627
309	8296,65	1,066701	0,0525
359	9639,15	1,054944	0,0420
409	10981,65	1,043224	0,0314
459	12324,15	1,031537	0,0205
509	13666,65	1,019860	0,0094

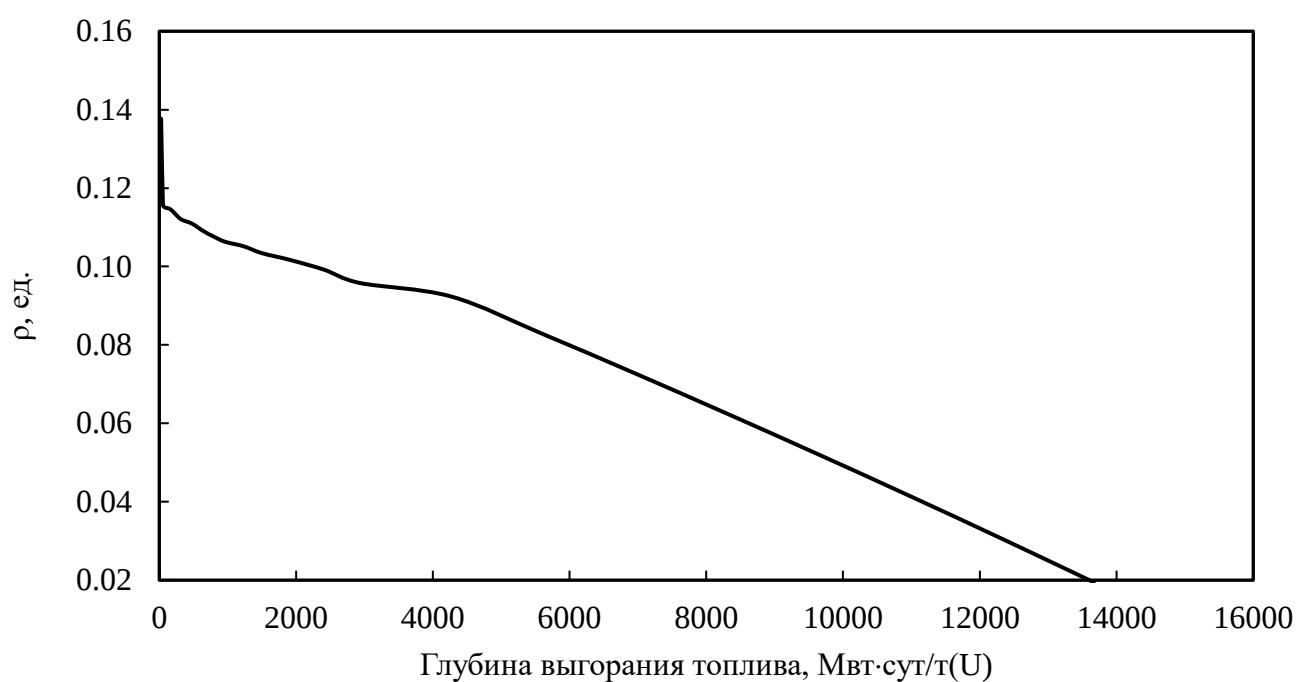


Рисунок 2.6 - график зависимости реактивности от глубины выгорания топлива

Из рисунка 2.6 видно, что после одних суток с момента работы реактора реактивность резко падает из-за отравления ксеноном. Таким образом потеря реактивности на отравление ксеноном составляет 0,022 ед.

Далее были построены графики изменения нуклидного состава ядерного топлива от энерговыработки, которые представлены на рисунках 2.7, 2.8 и 2.9 соответственно.

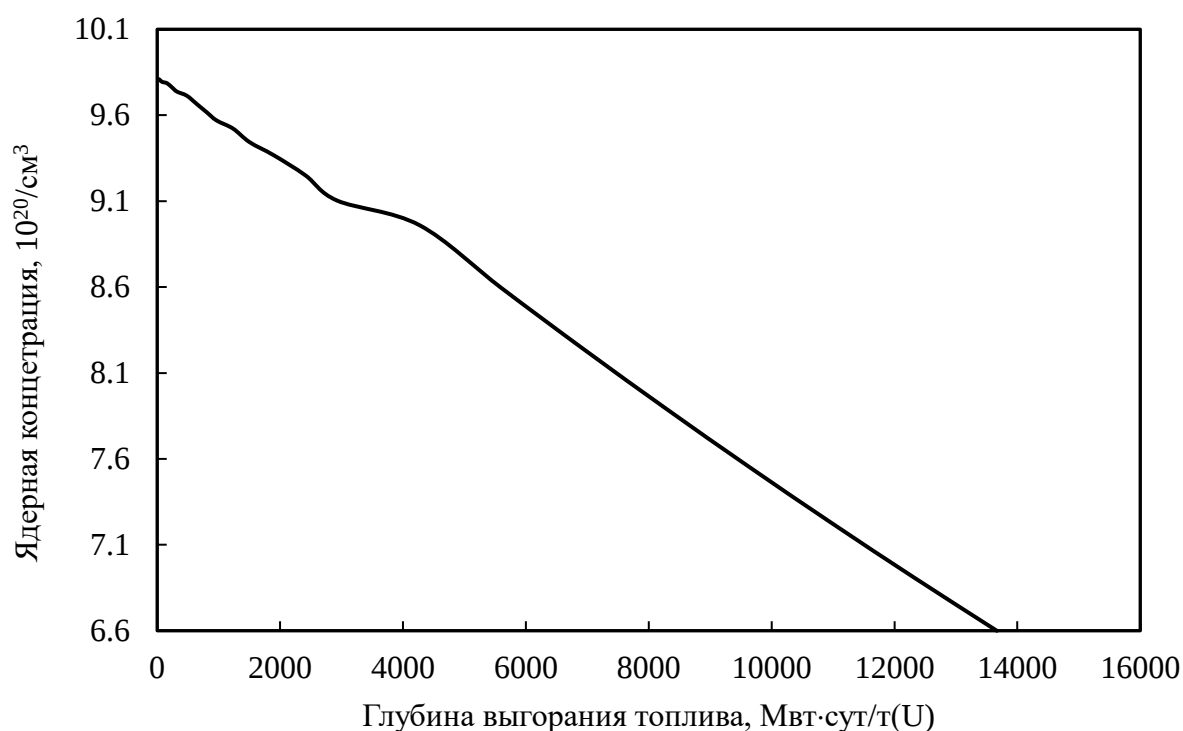


Рисунок 2.7 Изменение концентрации U^{235} от глубины выгорания топлива

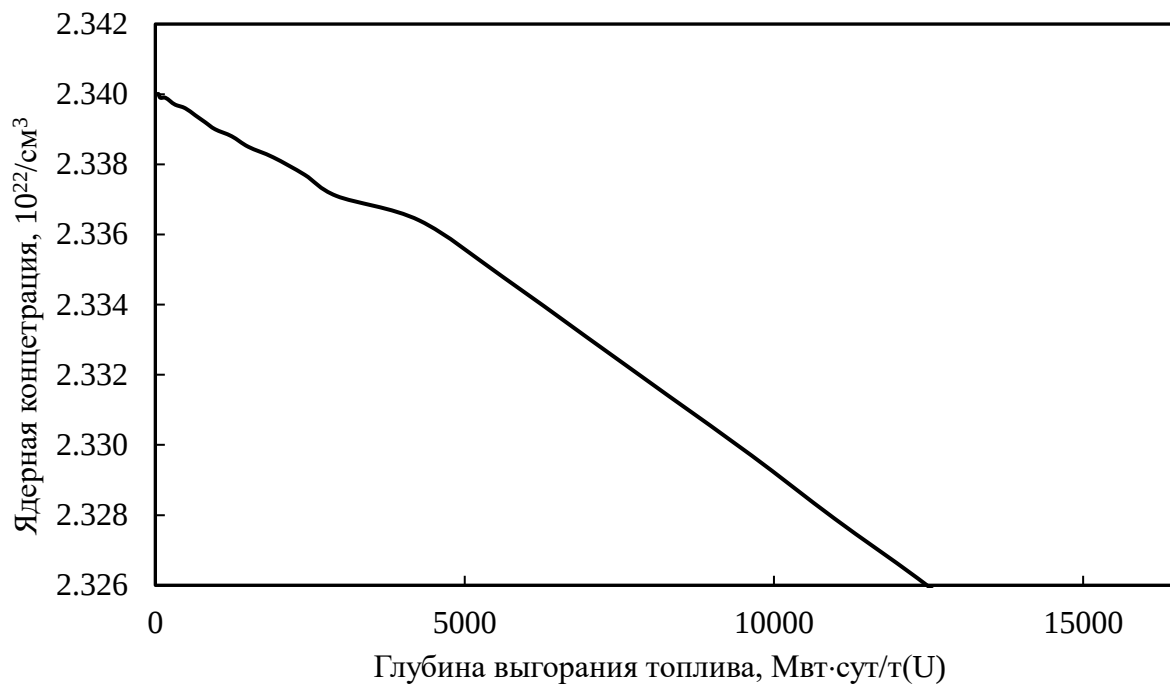


Рисунок 2.8 Изменение концентрации U^{238} от глубины выгорания топлива

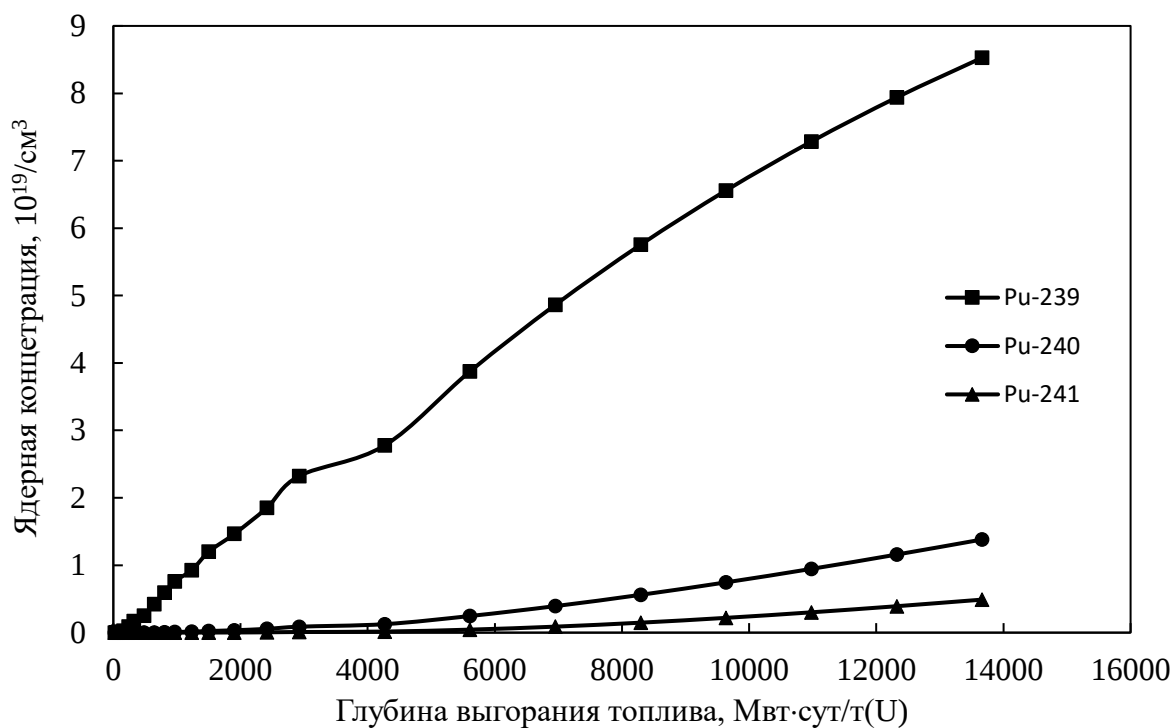


Рисунок 2.9 Изменение концентрации Pu^{239} , Pu^{240} и Pu^{241} от глубины выгорания топлива

Как видно из рисунка 2.9 концентрации Pu^{240} и Pu^{241} все время увеличиваются, а концентрация Pu^{239} увеличивается пока не дойдет до стационарного состояния.

2.8.2 Расчет «горячего» реактора

В приложении Е код, содержащий в себе входные данные, предоставляемые программе для расчета «горячего» реактора.

Полученное в результате расчетов значение бесконечного коэффициента размножения составило 1,154571.

Определим температурный коэффициент реактивности:

$$\alpha = \frac{\Delta K_{\infty}}{\Delta T} = \frac{1,1596 - 1,1545}{860 - 400} = 0,0000018 \text{ K}^{-1}.$$

Температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \rho^{zop} - \rho^{хол} = 0,00038.$$

2.8.3 Расчет гомогенной ячейки

Для проведения данного расчета была построена гомогенная ячейка (гомогенизация 2 рода) в горячем состоянии, код которой представлен в приложении Ж.

Рассчитаем кинетику изменения K_{inf} в зависимости от энерговыработки, полученные результаты представлены на рисунке 2.10.

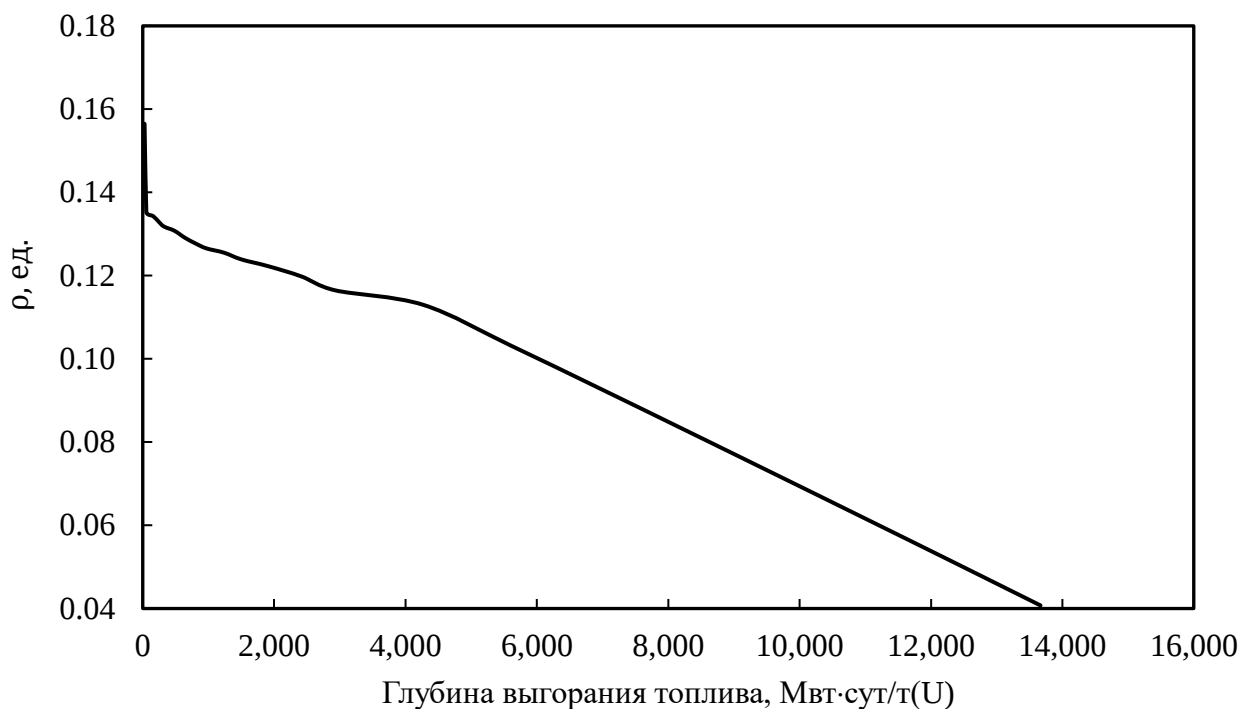


Рисунок 2.10 Зависимость реактивности от глубины выгорания топлива

Для того чтобы построить более точные графики функций плотности потока быстрых и тепловых нейтронов по радиусу расчетной модели, фиктивный блок был разбит на 20 точек, а замедлитель на 10. 69 энергетических групп были свернуты в 3 группы, включающие быстрые, резонансные и тепловые нейтроны. Результаты расчета представлены на рисунках 2.11 и 2.12.

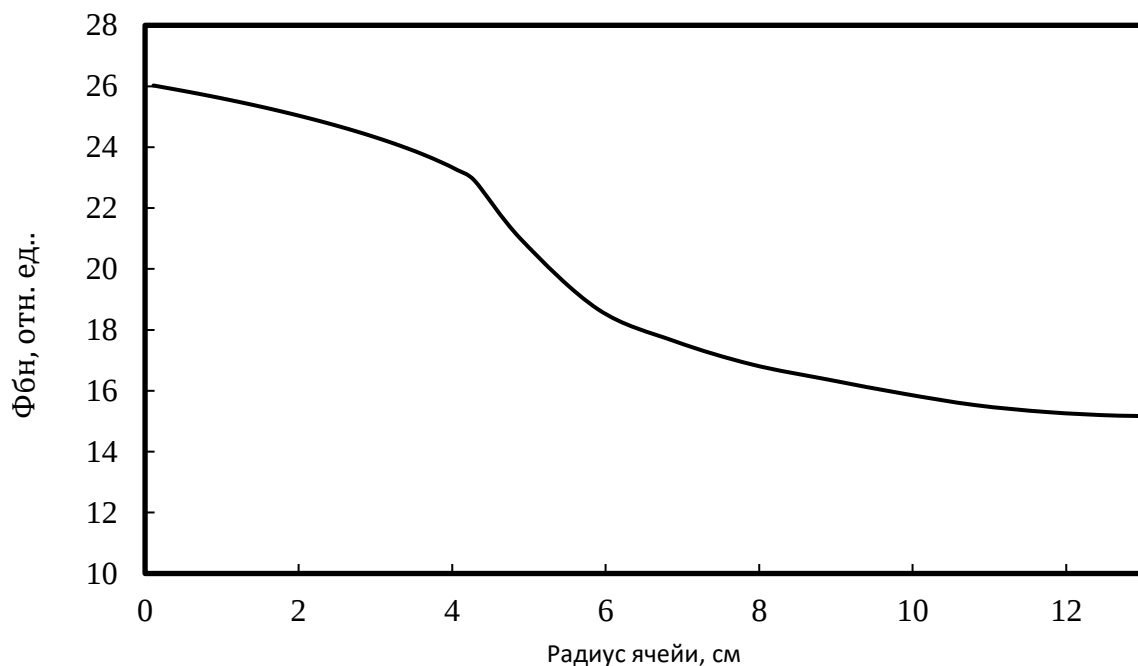


Рисунок 2.11 Распределение плотности потока быстрых нейтронов по радиусу элементарной ячейки

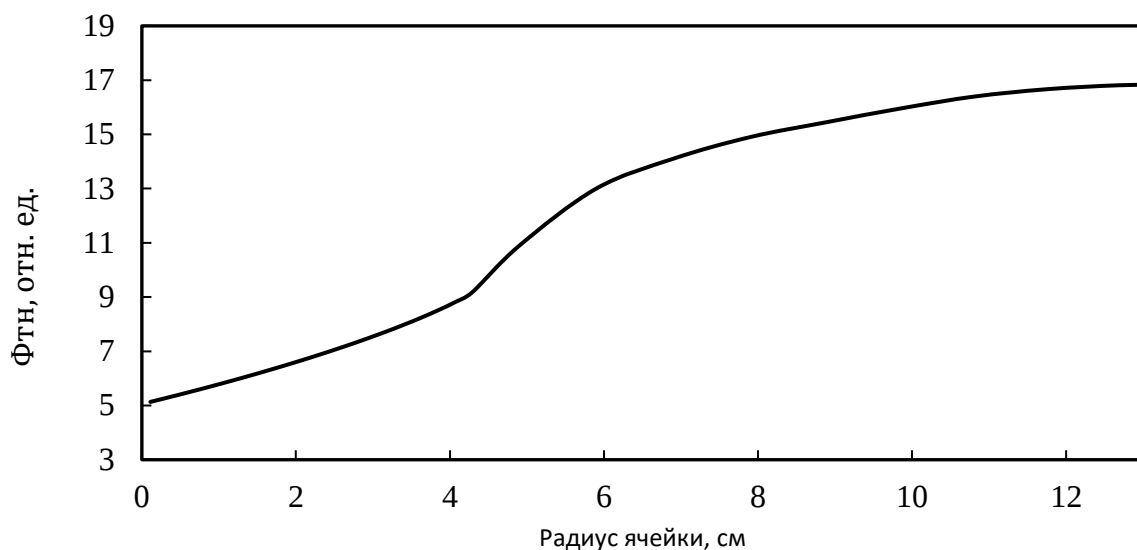


Рисунок 2.12 Распределение плотности потока тепловых нейтронов по радиусу элементарной ячейки

Из рисунков 2.11 и 2.12 видно, что плотность потока быстрых нейтронов уменьшается от центра фиктивного блока до конца замедлителя вследствие замедления нейтронов, а поток тепловых нейтронов наоборот увеличивается.

Далее был произведен расчет энерговыделения по радиусу фиктивного блока, результаты расчета представлены на рисунке 2.13.

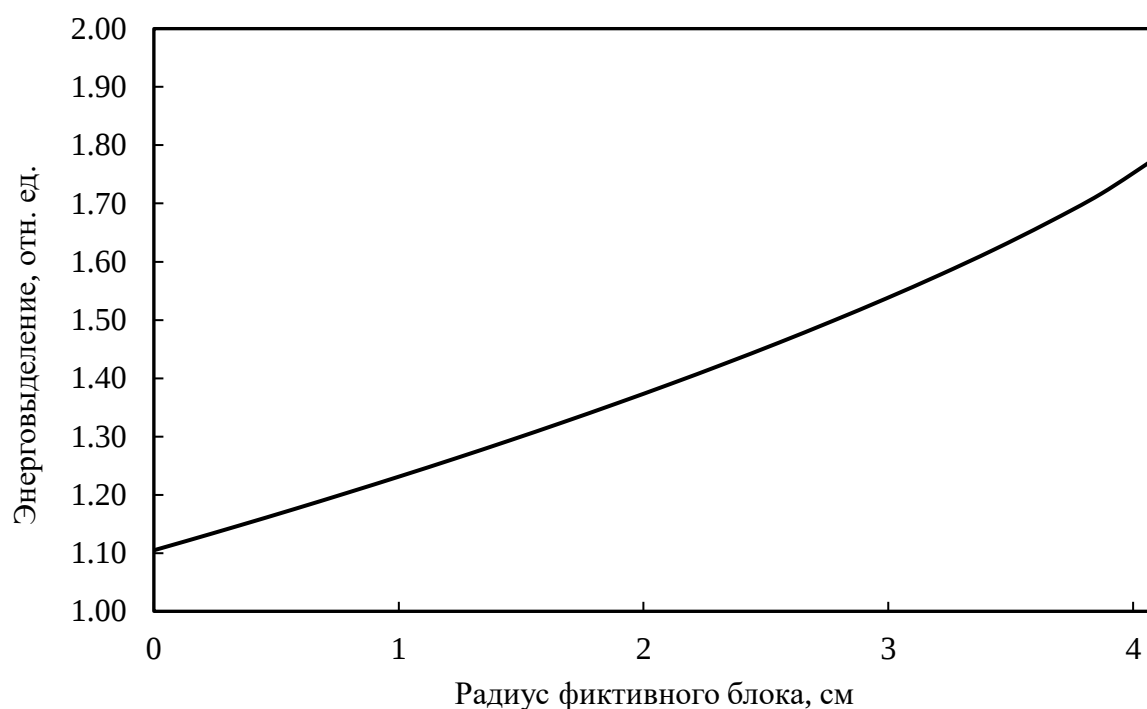


Рисунок 2.13 Распределение энерговыделения по радиусу фиктивного блока

Из рисунка 2.13 видно, что энерговыделение возрастает экспоненциально по мере приближения к границе фиктивного блока из-за диффузии тепловых нейтронов из замедлителя в фиктивный блок.

2.9 Расчет ТЭР при различных условиях эксплуатации

Параметры гетерогенной ячейки были изменены до горячего состояния последовательным разогревом с шагом в 200 градусов. Результаты расчета ТЭР для последовательного разогрева гетерогенной ячейки представлены на рисунке 2.14.

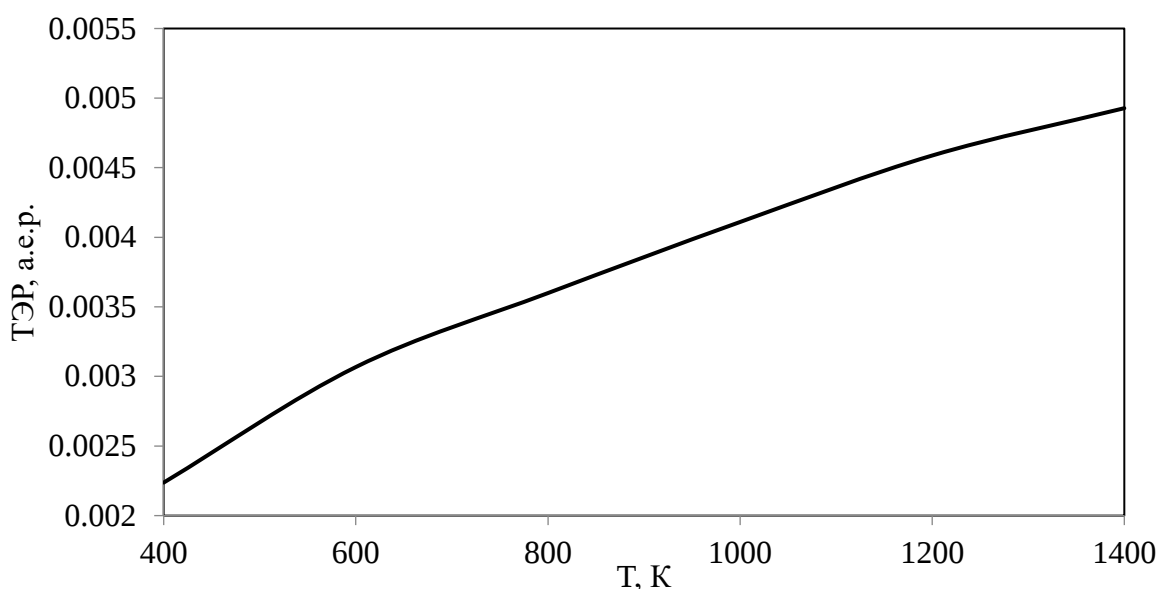


Рисунок 2.14 Зависимость ТЭР от температуры

Из рисунка 2.14 видно, что ТЭР с ростом температуры увеличивается, что соответствует кривой ТЭР 1 типа. Из данной зависимости следует то, что для эксплуатации данного реактора необходим жесткий контроль положительной обратной связи по данному параметру

Далее был проведен анализ зависимости ТЭР в начале кампании и в ее конце, которая изображена на рисунке 2.15.

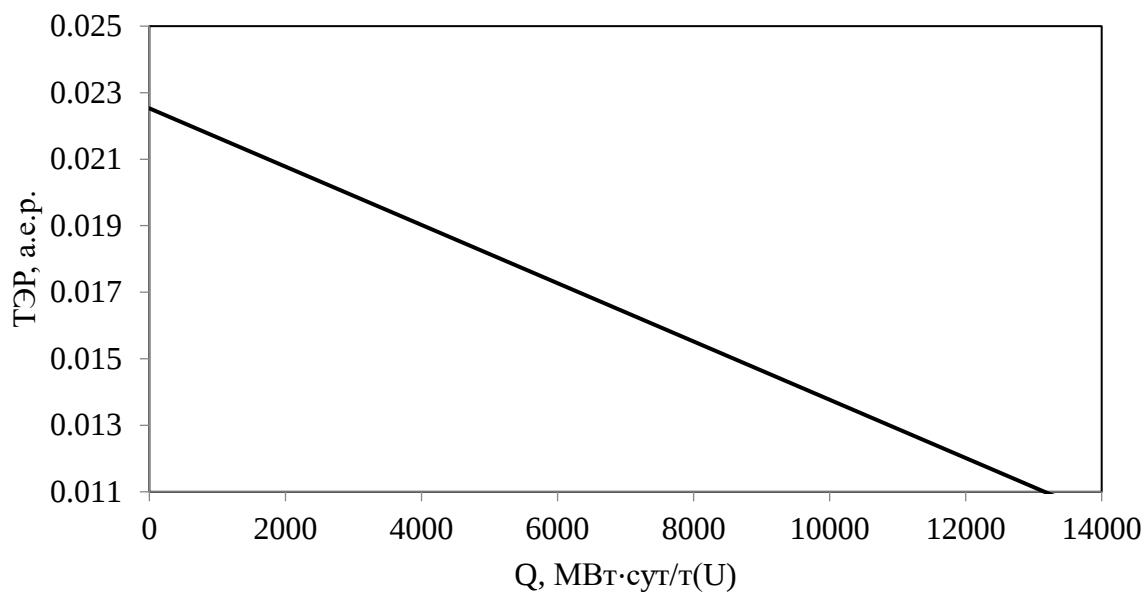


Рисунок 2.15 Зависимость ТЭР от энергосыработки

Из рисунка 2.15 видно, что влияние температурных эффектов в конце кампании меньше, чем в ее начале.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель раздела – комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы. Необходимо оценить полные денежные затраты на исследование (проект), а также дать приближенную экономическую оценку результатов ее внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы. Раздел должен быть завершен комплексной оценкой научно-технического уровня ВКР на основе экспертных данных.

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.

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным 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 вышеуказанные данные представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%

Продолжение таблицы 3.1

Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 30% 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%

3.2 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ может осуществляться двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Первый применяется в случаях наличия достаточно развитой нормативной базы трудоемкости планируемых процессов, что в свою очередь обусловлено их высокой повторяемостью в устойчивой обстановке. Так как исполнитель работы зачастую не располагает соответствующими нормативами, то используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Аналоговый способ привлекает внешней простотой и околонулевыми затратами, но возможен только при наличии в поле зрения исполнителя ВКР не устаревшего аналога, т.е. проекта в целом или хотя бы его фрагмента, который

по всем значимым параметрам идентичен выполняемой ВКР. В большинстве случаев он может применяться только локально – для отдельных элементов.

Экспертный способ используется при отсутствии вышеуказанных информационных ресурсов и предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию. Для определения вероятных значений продолжительности работ $t_{ОЖ}$ применяется по усмотрению исполнителя одна из двух формул.

$$t_{ОЖ} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5} \quad (3.1)$$

$$t_{ОЖ} = \frac{t_{\min} + 4t_{\text{prob}} + t_{\max}}{6} \quad (3.2)$$

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

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

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

Вторая формула дает более надежные оценки, но предполагает большую «нагрузку» на экспертов.

Для выполнения перечисленных в таблице 3.1 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель ВКР;
- научный руководитель.

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

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях:

$$T_{\text{РД}} = \frac{t_{ОЖ}}{K_{\text{ВН}}} \cdot K_{\text{Д}} \quad (3.3)$$

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

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

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} \quad (3.4)$$

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

$T_{\text{ВД}}$ – выходные дни;

$T_{\text{ПД}}$ – праздничные дни.

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

В таблице 3.2 приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле 6.1, при использовании формулы 6.2 необходимо вставить в таблицу дополнительный столбец для $t_{\text{проб}}$. Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента $K_{\text{д}} = 1,2$.

Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{\text{ож}} \cdot K_{\text{д}}$. Столбцы 8 и 9 – трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на $T_{\text{к}}=1,212$. Итог по столбцу 5 дает общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоемкости для каждого из участников проекта. Величины трудоемкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9 кроме итогов, позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленного в приложении Г.

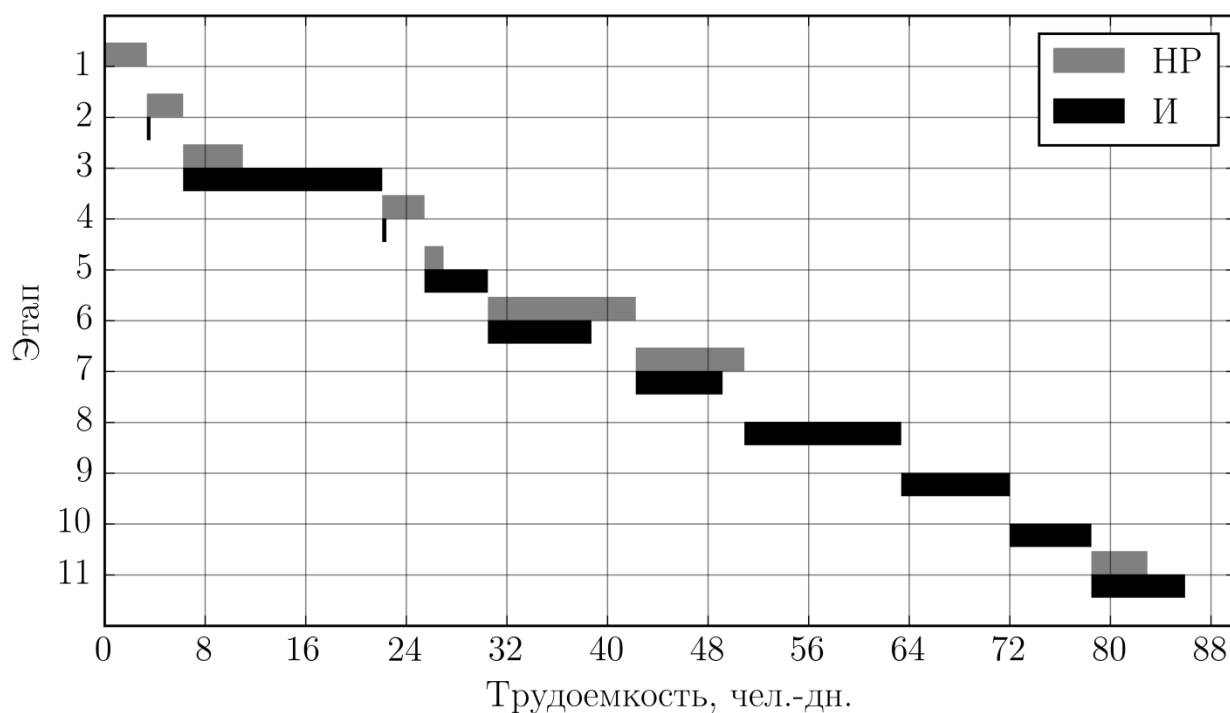


Рисунок 3.1 – Линейный график работ.

3.3 Расчет накопления готовности проекта

Цель данного пункта – оценка текущих состояний (результатов) работы над проектом. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего (i -го) этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом.

Введем обозначения:

- $TP_{\text{общ}}$ – общая трудоемкость проекта;
- TP_i (TP_k) – трудоемкость i -го (k -го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;
- TP_i^H – накопленная трудоемкость i -го этапа проекта по его завершении;
- TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоемкость 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:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}} \quad (3.5)$$

Применительно к таблице (3.1) величины TP_{ij} (TP_{kj}) находятся в столбцах (6, $j = 1$) и (7, $j = 2$). $TP_{\text{общ.}}$ равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Пример расчета TP_i (%) и $СГ_i$ (%) на основе этих данных содержится в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	TP_i , %	$СГ_i$, %
Постановка задачи	4,86	4,86
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	4,86	9,72
Подбор и изучение материалов по тематике	4,86	14,58
Разработка календарного плана	4,86	19,44
Обсуждение литературы	4,86	24,31
Выбор исходных параметров	4,86	29,17
Методика расчета	22,22	51,39
Нейтронно-физический расчет	27,08	78,47
Оформление расчетно-пояснительной записки	11,81	90,28
Оформление графического материала	4,86	95,14
Подведение итогов	4,86	100,00

3.3 Расчет сметы на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения 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.

3.3 Расчет 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. Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в границах, представленных в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	250	1 уп.	250
Картридж для принтера	1550	1 шт.	1550
Итого:			1800

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

$$C_{\text{МАТ}} = 1800 \cdot 1,05 = 1890.$$

3.4 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, в его роли выступает исполнитель проекта, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083}, \quad (3.6)$$

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

Пример расчета затрат на полную заработную плату приведены в таблице 3.5. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 3.1. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{ДОП.ЗП}} = 1,188$; $K_{\text{Р}} = 1,3$. Для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{И}} = K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{ДОП.ЗП}} \cdot K_{\text{Р}}; \quad (3.7)$$

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

Таблица 3.5 – 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	33664	1342,10	17	1,699	38764,00
И	7864	313,52	28	1,620	14221,23
Итого:					52985,23

3.5 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3; \quad (3.8)$$

$$C_{\text{соц}} = 52985,23 \cdot 0,3 = 15895,57.$$

3.6 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (3.9)$$

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

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 3.1 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (3.10)$$

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

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

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_c, \quad (3.11)$$

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 $K_C = 1$.

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – 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	224	0,3	386,3
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			387,42

3.7 Расчет амортизационных расходов

В данной статье представлен расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot n}{F_{\text{Д}}}, \quad (3.12)$$

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 2019 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_A определяется как величина обратная C_A , в данном случае это:

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

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать:

$$C_{AM} = \frac{0,4 \cdot 224 \cdot 60000 \cdot 1}{2384} = 2255,03.$$

3.8 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{ПРОЧ} = (C_{МАТ} + C_{ЗП} + C_{СОЦ} + C_{ЭЛ.ОБ} + C_{АМ}) \cdot 0,1. \quad (3.13)$$

Прочие расходы в нашем случае:

$$C_{ПРОЧ} = (1890 + 52985,23 + 20431,24 + 387,42 + 2255,03) \cdot 0,1 = 7152,32.$$

3.9 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Нейтронно-физический расчёт ЯР типа УГР тепловой мощностью 1800 МВт».

Таблица 3.7 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{МАТ}$	1890,00
Основная заработная плата	$C_{ЗП}$	52985,23
Отчисления в социальные фонды	$C_{СОЦ}$	15895,57
Расходы на электроэнергию	$C_{ЭЛ.ОБ}$	387,42
Амортизационные отчисления	$C_{АМ}$	2255,03
Прочие расходы	$C_{ПРОЧ}$	7152,32
Итого:		80565

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 80565$ руб.

3.10 Расчет прибыли

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

$$G = C \cdot 0,2; \quad (3.14)$$

$$G = 80565 \cdot 0,2 = 16113.$$

3.11 Расчет НДС

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

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2; \quad (3.15)$$

$$\text{НДС} = (80565 + 16113) \cdot 0,2 = 19335.$$

3.12 Цена разработки ВКР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$\Pi_{\text{ВКР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (3.16)$$

$$\Pi_{\text{ВКР}} = 80565 + 16113 + 19335 = 116014.$$

3.13 Оценка экономической эффективности проекта

Ввиду того, что данная разработка носит условно-проектный характер, и ее внедрение не предполагается, то оценка её экономической эффективности, в частности определение срока окупаемости данного проекта также может быть только условной. Но и это невозможно в рамках данной работы ввиду закрытости необходимых данных.

Заключение

В ходе работы произведён предварительный и нейтронно-физический расчёт реактора типа УГР тепловой мощностью 1800 МВт, геометрические размеры и общее устройство соответствует реактору РБМК-1000.

В результате получены следующие значения скорости прокачки теплоносителя, бесконечного и эффективного коэффициентов размножения для стандартной элементарной ячейки, содержащей топливо с обогащением 4 % по U^{235} , которые равны 2,01 м/с, 1,27 и 1,23 соответственно.

С помощью оптимизации показаны возможные варианты увеличения запаса реактивности ядерного реактора, а именно увеличение размеров ячейки и радиуса топливной таблетки. Для повышения значения бесконечного коэффициента размножения проведена оптимизация элементарной ячейки, в результате которой для оптимальных параметров активной зоны (при радиусе топливной таблетки равном 0,75 и размере ячейки в 27 см.) максимальное значения бесконечного коэффициента размножения равно 1,33, а значение эффективного коэффициента размножения равно 1,27.

При расчёте «горячего» реактора в области рабочих температур одnogрупповым методом получены следующие результаты:

- бесконечный коэффициент размножения нейтронов 1,31;
- эффективный коэффициент размножения нейтронов 1,25;
- температурный эффект реактивности 1,5 %;
- температурный коэффициент реактивности $4,9 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.

Из-за положительного значения температурного эффекта могут возникнуть сложности при управлении ядерным реактором, высвобожденную реактивность необходимо компенсировать.

Для сравнения полученных данных и проверки правильности расчётов проведен расчет с помощью программного обеспечения WIMS-D5.

- бесконечный коэффициент размножения нейтронов 1,15;
- температурный эффект реактивности 0,4 %;
- температурный коэффициент реактивности $1,8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

На основе представленных данных можно сделать вывод, что оба метода достаточно точны. Так как разница в полученных результатах составляет менее 10%.

Построены зависимости нуклидного состава топлива, из которых видно, что количество ядер U^{235} и U^{238} постепенно снижается, а количество ядер Pu наоборот увеличивается.

Выполнен многогрупповой расчет ядерного реактора, построены графики распределения плотности потоков нейтронов

Определен температурный эффект реактивности исходя из расчетов WIMS для коэффициентов размножения в бесконечной среде, который равен 0,00038. Положительное значение так же показывает верность одnogрупповго расчета.

Построены графики плотности потока тепловых и быстрых нейтронов по радиусу, из которых видно, что количество быстрых нейтронов по мере их замедления в фиктивном блоке и замедлителе уменьшается, а количество тепловых наоборот увеличивается.

Из полученного графика зависимости энерговыделения от радиуса экспериментального канала, видно, что наибольшее энерговыделение находится на границе фиктивного блока и замедлителя из-за диффузии тепловых нейтронов.

Выполнена оценка экономической эффективности проекта, цена разработки составила 116014 рублей.

Проведён анализ вредных и опасных факторов при выполнении работы.

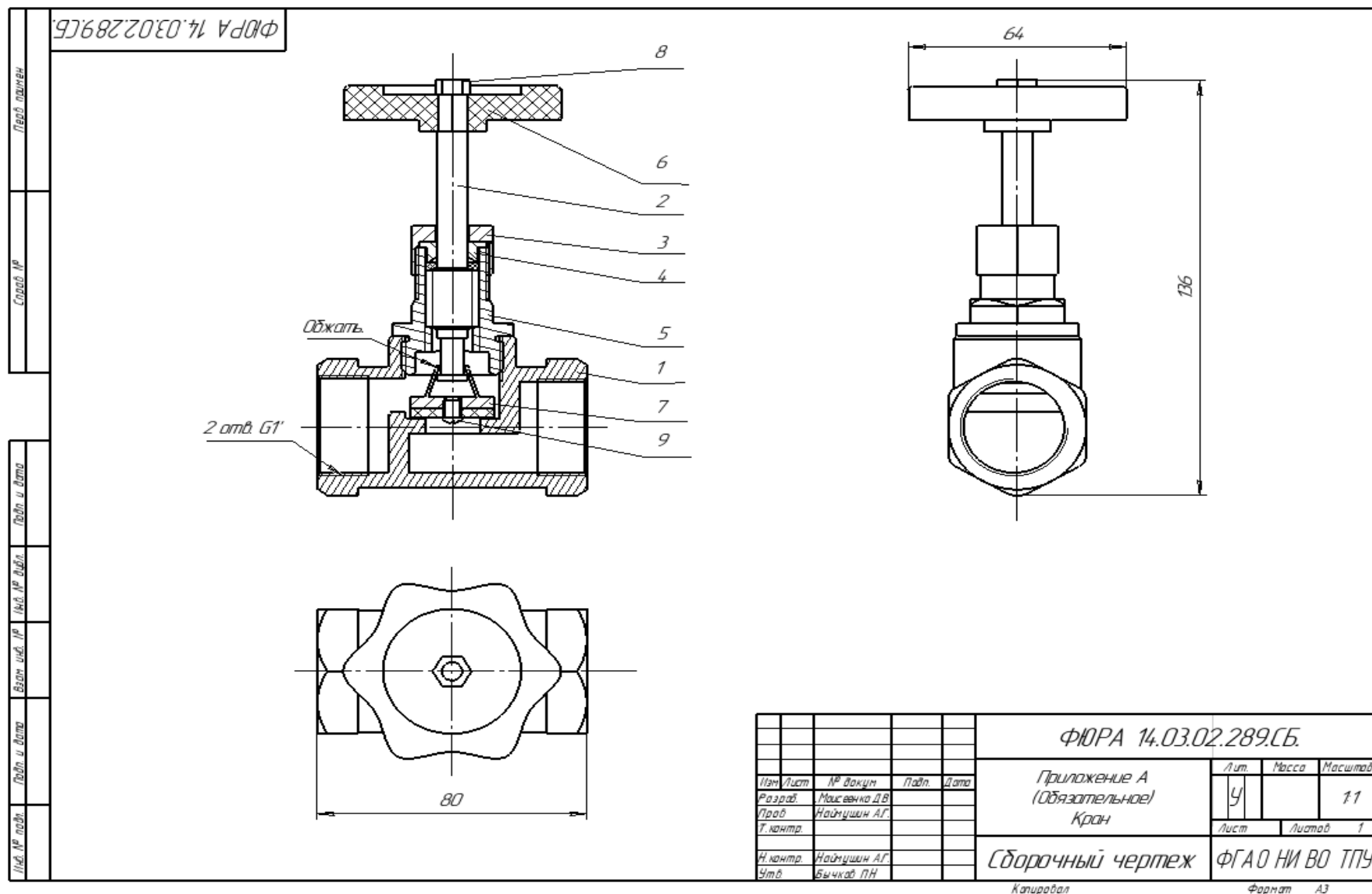
Список использованных источников

1. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
2. Абагян, Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник / Л.П. Абагян. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 137 с.
3. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие / В. И. Бойко, Ф. П. Кошелев, И.В Шаманин, Г.Н Колпаков. – Томск: Томский государственный университет, 2002. – 192 с.
4. Владимиров, В.И. Физика ядерных реакторов: практические задачи по их эксплуатации / В.И. Владимиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 480 с.
5. Савандер, В.И. Физическая теория ядерных реакторов: Учебное пособие / В.И. Савандер, М.А. Увакин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 152 с.
6. Беляев, С.А. Методика теплового и нейтронно- физического расчётов реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие / С.А. Беляев, А.В. Кузьмин. – Томск: Изд-во ТПИ им. С. М. Кирова, 1981. – 81 с.
7. Колпаков Г.Н, Конструкция твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: Учебное пособие / Г.Н. Колпаков, О.В. Селиваникова. – Томск. Изд-во: ТПУ. 2009 г. – 118 с.
8. Кольчужкин, А.М. Метод Монте-Карло в теории переноса излучений: Учебное пособие / А.М. Кольчужкин. – Томск: ТПУ. 2003, 104 с.
9. Гуревич, М.И. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCSU: Учебное пособие / М. И. Гуревич, Д.А. Шкаровский. М.: НИЯУ МИФИ. – 154 с.
10. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: Учеб. Пособие для вузов / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алтухов. -3-е изд., перерад. и доп. – Екб: Издательство ЮЛАНД, 2016 год. – 512 с., ил.

11. Бойко В.И. Топливные материалы в ядерной энергетике: Учебное пособие / В. И. Бойко, Г. Н. Колпаков, О. В. Селиванникова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 186 с.
12. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. / И.М Соболев – М.: Наука, 1973.
13. Фейнберг, С.М. Теория ядерных реакторов. Т. 1. Элементарная теория реакторов: Учебник для вузов / С.М. Фейнберг, С.Б. Шихов, В.Б. Троянский. М.: Атомиздат, 1978, 400 с.
14. Halsall M.J. A Summary of WIMSD4 Input Options // AEEW-M 1327, Reissued June 1980.
15. J.R. Askew et al., A general description of the lattice code WIMS, Journal of the British Nuclear Energy Society 5 (1) p.p. 564-584, 1966.
16. M.J. Halsall, C.J. Taubman, The WIMS '1986' Nuclear Data Library, AEEW-R 2133, 1986.
17. 8. Гальченко В. В. Валідація бібліотек ядерних даних для коду WIMSD5B / В. В. Гальченко, А. А. Мішин, В. В. Муха, Н. М. Рабченко // Щорічна наук. конф. ІЯД НАНУ. — Київ, 2014. — С. 112—113.
18. WIMSD5, Deterministic Multigroup Reactor Lattice Calculations. NEA-1507/04. OECD, NEA Data Bank, France, 2004.
19. Упрощенная математическая модель и реализация остаточного ресурса ядерного топлива при выводе из эксплуатации реактора типа РБМК. Загребав А.М., Залужная Г.А., Наумов В.И. Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 5. С. 255-258.
20. Анализ последовательностей отказов для оценки уязвимости АЭС с реактором РБМК при экстремальных воздействиях. Мишукова О.Н., Голубков А.В., Шиверский Е.А. В сборнике: Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2017 Москва, 2017. С. 246-249.

21. Structural investigation of RBMK nuclear graphite modified by $^{12}\text{C}^+$ ion implantation and thermal treatment. / Elena Lagzdina, Danielius Lingis, Artūras Plukisa, Rita Plukiene. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. Volume 444, 1 April 2019, Pages 23-32.
22. Экспериментальное исследование прочности графитовых блоков РБМК-1000. / Алишин М.И., Рахманов А.П., Решетин В.Л., Слободчиков А.В. В сборнике: Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2017 Москва, 2017. С. 196-198.
23. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя во входном участке ТВС. / Дмитриев С.М., Добров А.А., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2018. № 3. С. 168-175.
24. Сборник нормативных материалов по безопасности АЭС. М.: Энергоатомиздат., 1985.
25. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: Учеб. для неэнергетич. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1988. 479 с.
26. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных электростанций СП АЭС – 79. М.: Энергоиздат, 1981.
27. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 76). М.: Атомиздат, 1977.
28. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. [Текст]. – Взамен ГОСТ 12.1.004. – 85. – Введ. 01.07.92. – Утв. Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 14.06.91 № 875.
29. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17.07.99 №181 – ФЗ. // Российская газ. – 1999. – 11.02. – С. 5
30. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с. 40.

Приложение А



Приложение А

[illegible]

Приложение Б

(Обязательное)

Таблица Б.1 – Микроскопические и макроскопические сечения для элементов конструкционных материалов, замедлителя и теплоносителя

Вид сечения	Na	Fe	Cr	Ni	TI	Mn	C(сталь)
σ_a , барн	0,397	1,913	2,25	3,34	4,40	10,06	0,003
σ_s , барн	0,525	2,530	3,10	17,00	5,80	13,30	0
σ_{Σ} , барн	1,400	11,40	4,20	15,60	4,20	2,10	4,7
σ_t , барн	1,755	13,20	6,41	18,79	8,55	12,14	4,42
Σ_a , см ⁻¹	0,00965	0,11042	0,036788	0,03160	0,003019	0,0173063	0
Σ_s , см ⁻¹	0,01275	0,14594	0,050650	0,16081	0,003990	0,0228743	0
Σ_{Σ} , см ⁻¹	0,03401	0,65760	0,068623	0,14757	0,002889	0,0036117	0,000485
Σ_{tr} , см ⁻¹	0,04263	0,76145	0,104725	0,17769	0,005879	0,0208819	0,000456
ξ	0,08451	0,03529	0,037975	0,03352	0,041096	0,0359281	0,157895
$\xi\Sigma_{\Sigma}$, см ⁻¹	0,00287	0,02321	0,002606	0,00495	0,000119	0,0001298	0,000076

Приложение В

(Обязательное)

Таблица В.1 – Гомогенизированные макроскопические сечения для элементов топлива, конструкционных материалов, замедлителя и теплоносителя

вид сечения	U235	U238	O (топл)	Na	Fe	Cr	Ni	C (зам)	Ti	Mn
$\Sigma f, \text{см}^{-1}$	0,1220	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma a, \text{см}^{-1}$	0,1430	0,0136	0	0,0047	0,0209	0,0069	0,00597	0,0004	0,0004	0,00327
$\Sigma c, \text{см}^{-1}$	0,0292	0,0188	0	0,0062	0,0276	0,0096	0,03036	0	0,0023	0,00432
$\Sigma s, \text{см}^{-1}$	0,0043	0,0624	0,0541	0,0166	0,1242	0,0129	0,02786	0,3890	0,0020	0,00068
$\Sigma tr, \text{см}^{-1}$	0,1480	0,0760	0,0520	0,0208	0,1438	0,0198	0,03355	0,3659	0,0024	0,00394
ξ	0,0084	0,0084	0,1200	0,0845	0,0353	0,0379	0,03352	0,1579	0,0411	0,0359
$\xi \Sigma s$	0,00004	0,00052	0,0065	0,001401	0,00438	0,000492	0,0009339	0,061428	0,00008	0,00002

Приложение Г

(Обязательное)

Таблица Г.1 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	2	4	2,8	3,36	–	4,07	–
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,4	2,88	0,29	3,5	0,35
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	12	15	13,2	4,75	15,84	5,75	19,16
Разработка календарного плана	НР, И	2	4	2,8	3,36	0,33	4,07	0,39
Обсуждение литературы	НР, И	3	6	4,2	1,51	5,04	1,83	6,1
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	7	14	9,8	11,76	8,23	14,25	9,9
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	6	9	7,2	8,64	6,91	10,47	8,36
Расчет принципиальной схемы устройства	И	8	14	10,4	–	12,48	–	15,1
Оформление расчетно- пояснительной записки	И	6	9	7,2	–	8,64	–	10,45
Оформление графического материала	И	5	6	5,4	–	6,48	–	7,84
Подведение итогов	НР, И	5	8	6,2	4,46	7,44	5,4	9
Итого:				71,6	40,54	63,01	49,34	86,65

Приложение Д
(Справочное)

CELL 7

SEQUENCE 1

NGROUP 4 2

NMESH 6

NMATERIAL 4 1

NREGION 3 10

NRODS 19 1 100 100 3 4 2

PREOUT

INITIATE

RODSUB 1 1 0.595 0

RODSUB 1 2 0.685 2

RODSUB 2 1 0.12 0

RODSUB 2 2 0.575 1

RODSUB 2 3 0.595 0

RODSUB 2 4 0.685 2

RODSUB 3 1 0.12 0

RODSUB 3 2 0.575 1

RODSUB 3 3 0.595 0

RODSUB 3 4 0.685 2

MATERIAL 1 -1 420 1 2235 0.000455 8238 0.0223 6016 0.0455

MATERIAL 2 -1 420 2 2056 0.0577 52 0.0163 58 0.00946 \$

48 0.000688 2012 0.000103 55 0.00172

MATERIAL 3 -1 420 3 23 0.0243

MATERIAL 4 -1 420 4 2012 0.0828

ANNULUS 1 4.2 3 2

ANNULUS 2 4.4 2 2

ANNULUS 3 14.1 4 2

MESH 2 2 2

ARRAY 1 1 1 0 0.

ARRAY 2 1 6 1.74 0.

ARRAY 3 1 12 3.05 0.78

NPIJAN 3

FEWGROUPS 5 15 45 69

POWERC 1 26.85 1 1

BEGINC

BEGINC

.....

Приложение Е

(Справочное)

CELL 7

SEQUENCE 1

NGROUP 4 2

NMESH 6

NMATERIAL 4 1

NREGION 3 10

NRODS 19 1 100 100 3 4 2

PREOUT

INITIATE

RODSUB 1 1 0.595 0

RODSUB 1 2 0.685 2

RODSUB 2 1 0.12 0

RODSUB 2 2 0.575 1

RODSUB 2 3 0.595 0

RODSUB 2 4 0.685 2

RODSUB 3 1 0.12 0

RODSUB 3 2 0.575 1

RODSUB 3 3 0.595 0

RODSUB 3 4 0.685 2

MATERIAL 1 -1 700 1 2235 0.000978 8238 0.0234 6016 0.0489

MATERIAL 2 -1 700 2 2056 0.0577 52 0.0163 58 0.00946 \$

48 0.000688 2012 0.000103 55 0.00172

MATERIAL 3 -1 700 3 23 0.0243

MATERIAL 4 -1 620 4 2012 0.0828

ANNULUS 1 4.2 3 2

ANNULUS 2 4.4 2 2

ANNULUS 3 14.1 4 2

MESH 2 2 2

ARRAY 1 1 1 0 0.

ARRAY 2 1 6 1.74 0.

ARRAY 3 1 12 3.05 0.78

NPIJAN 3

FEWGROUPS 5 15 45 69

POWERC 1 26.85 1 1

BEGINC

BEGINC

.....

Приложение Ж

(Справочное)

CELL 6

SEQUENCE 1

NGROUP 3

NMESH 30

NMATERIAL 3 1

NREGION 3

PREOUT

INITIATE

ANNULUS 1 4.4 1 20

ANNULUS 2 9.4 2 5

ANNULUS 3 14.1 3 5

MESH 20 5 5

MATERIAL 1 -1 690 1 \$

2235 0.000288702 \$

8238 0.006928842 \$

23 0.0108 \$

2056 0.0109 \$

52 0.00308 \$

58 0.00178 \$

48 0.000129 \$

6016 0.014435087

MATERIAL 2,-1,600.,3,2012,0.0828

MATERIAL 3,-1,600.,3,2012,0.0828

S 32

FEWGROUPTS 19 40 69

POWERC 1 26.85 1 1

BEGINC

BEGINC