

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

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа УГР

УДК 621.039.52:621.039.577.001.24

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3В	Нагаев Евгений Викторович		

Руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ	Д.С. Исаченко	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Е.В. Меньшикова	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ ФТИ	О.Ю. Долматов	к.ф.-м.н., доцент		

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Общекультурные компетенции	
Р 1	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.
Р 2	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.
Р 3	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.
Р 4	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.
Р 5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р 6	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.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р 7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р 8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны.
Р 9	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.
Р 10	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.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Р 11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
Р 12	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.
Р 13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.
Р 14	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.
Р 15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

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

Институт Физико-технический
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Кафедра Физико-энергетические установки

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой ФЭУ
 _____ О.Ю. Долматов
 (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
0А3В	Нагаеву Евгению Викторовичу

Тема работы:

Нейтронно-физический расчет реактора УГР мощностью 2100 МВт	
Утверждена приказом проректора-директора (директора), (дата, номер)	<u>16.02.2017 № 958/с</u>

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2017
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т.д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).	– Тепловая мощность 2100 [МВт]; – ядерное горючее $PuO_2 + UO_2$; – обогащение урана 2,4 %; – температура на входе 260° [С]; – температура на выходе 490° [С]; – ТВЭЛы стержневые с наружным охлаждением; – материалы оболочек ТВЭЛОВ и кассет IXI8H9T.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	– Нейтронно-физический расчет «холодного» реактора; – нейтронно-физический расчет «горячего» реактора; – расчёт нуклидного состава (в результате отравления, шлакования); – многогрупповой расчет; – компенсация избыточной реактивности; – расчет длительности кампании; – расчет K_{∞}
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей).	– Презентация; – чертеж ячейки.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Е.В. Меньшикова
Социальная ответственность	Т.С. Гоголева
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
нет	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	08.05.2017
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ	Д.С. Исаченко	к.ф.-м.н.		08.05.2017

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АЗВ	Нагаев Евгений Викторович		08.05.2017

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A3B	Нагаеву Евгению Викторовичу

Институт	ФТ	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих:</i>	– Материальные затраты – 107 руб.; – заработная плата – 12452 руб.; – бюджет затрат НИИ – 1756 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов:</i>	Тариф на электроэнергию – 5,8 руб. за 1 кВт·ч.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования:</i>	– Районный коэффициент – 30 %; – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 27,10 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НИИ;
2. Сегментирование рынка;
3. Оценка конкурентоспособности технических решений;
4. Матрица SWOT;
5. График проведения и бюджет НИИ.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	08.05.2017
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСТТ	Е.В. Меньшикова	к.ф.н.		08.05.2017

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A3B	Нагаев Евгений Викторович		08.05.2017

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А3В	Нагаеву Евгению Викторовичу

Институт	ФТ	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– Вредных факторов производственной среды: повышенный уровень электромагнитных полей, отклонение показателей микроклимата от оптимальных, шум, ионизирующее излучение от ПЭВМ; – опасных факторов производственной среды: вероятность возникновения пожара, вероятность поражения электрическим током.
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме:	– Требование охраны труда при работе с ПЭВМ; – электробезопасность; – пожарная безопасность.

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; – предлагаемые средства защиты.
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– Электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	08.05.2017
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Т.С. Гоголева	к.ф.-м.н.		08.05.2017

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3В	Нагаев Евгений Викторович		08.05.2017

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

Институт Физико-технический

Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Уровень образования высшее

Кафедра Физико-энергетические установки

Период выполнения (весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2017
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
08.05.2017	<i>Выдача задания.</i>	
11.05.2017	<i>Выбор конструктивной схемы.</i>	
15.05.2017	<i>Расчет критических параметров проектируемого реактора.</i>	
22.05.2017	<i>Расчет характеристик «горячего реактора», многогрупповой нейтронно-физический расчет.</i>	
29.05.2017	<i>Расчет эффектов реактивности.</i>	
01.06.2017	<i>Сдача работы.</i>	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ	Д.С. Исаченко	к.ф.-м.н.		08.05.2017

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	О.Ю. Долматов	к.ф.-м.н., доцент		08.05.2017

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 117 страниц, 31 рисунок, 26 таблиц, 5 приложений, 1 чертеж, 1 спецификацию.

Ключевые слова: ядерный реактор, нейтронно-физический расчет, многогрупповой расчет, жидкометаллический теплоноситель, МОХ топливо.

Цель работы – оценка нейтронно-физических параметров реактора УГР мощностью 2100 МВт.

В результате определены нейтронно-физические параметры реактора УГР мощностью 2100 МВт. Используя итерационный метод для решения многогрупповых уравнений диффузии, получен спектр плотности потока нейтронов. Оценена длительность кампании ядерного топлива. Определено изменение нуклидного состава ядерного топлива, а также влияние делящегося материала на длительность кампании. Описаны внешние факторы, влияющие на финансовую составляющую работы.

Основные характеристики реактора: ядерный реактор типа УГР тепловой мощностью 2100 МВт с МОХ топливом и обогащением 2,4 % по U^{235} , использующий в качестве конструкционных материалов сталь марки 1X18H9T, теплоноситель – Na

Область применения: ядерные реакторы.

Экономическая эффективность/значимость работы средняя.

В будущем планируется продолжение более детального расчета реактора данного типа.

Содержание

Введение.....	15
1 Обзор литературы	16
1.1 Физические особенности: реактора, топлива, замедлителя, теплоносителя и конструкционных материалов	16
2 Нейтронно-физический расчёт реактора	19
2.1 Предварительный расчет.....	19
2.2 Расчет концентраций	22
2.2.1 Расчет концентрации топлива	23
2.2.2 Расчет концентрации теплоносителя	23
2.2.3 Расчет концентрации оболочки	24
2.2.4 Доли материалов в ячейке.....	24
2.3 Расчет микросечений и макросечений для «холодного» реактора.....	25
2.3.1 Микросечения и макросечения для U^{235}	26
2.3.2 Микросечения и макросечения для U^{238}	27
2.3.3 Микросечения и макросечения для Pu^{239}	28
2.3.4 Микросечения и макросечения для O^{16}	28
2.3.5 Макросечения для МОХ топлива.	29
2.3.6 Микросечения и макросечения для хрома	29
2.3.7 Микросечения и макросечения для никеля.....	30
2.3.8 Микросечения и макросечения для железа	31
2.3.9 Расчет макросечения для нержавеющей стали	31
2.3.10 Макросечения для Na^{23}	32
2.3.11 Макросечения для C^{12}	32
2.4 Расчет коэффициента размножения для «холодного» реактора.....	33
2.4.1 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды.....	33
2.4.2 Расчет коэффициента выхода нейтронов на одно поглощение	33
2.4.3 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах	34
2.4.4 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов	35
2.5 Вероятность избежать резонансного захвата.....	40
2.6 Расчет эффективного коэффициента размножения.....	42
2.7 Оптимизация параметров ячейки	48
2.8 Расчет ядерно-физических характеристик «горячего» реактора	55
2.8.1 Температурные эффекты реактивности.....	55

2.8.2 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды.....	58
2.8.3 Расчет эффективного коэффициента размножения	62
3. Финансовый менеджмент.....	74
3.1.Потенциальные потребители результатов исследования	74
3.2.Технология QuaD	74
3.3.SWOT-анализ.....	76
3.4.Структура работ в рамках научного исследования	79
3.5.Определение трудоемкости выполнения работ	80
3.6.Разработка графика проведения научного исследования	82
3.7.Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	84
3.8.Расчет материальных затрат НТИ	85
3.9.Основная заработная плата исполнителей темы	85
3.10. Отчисления во внебюджетные фонды	87
3.11. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта....	88
3.12 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	89
4. Социальная ответственность	92
4.1.Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	100
4.2.Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	102
4.2.1. Организационные мероприятия.....	102
4.2.2. Технические мероприятия.....	102
4.3.Условия безопасной работы.....	105
4.4.Электробезопасность	107
4.5.Пожарная и взрывная безопасность.....	108
Заключение	111
Список использованных источников	112
Приложение А	113
Приложение Б	114
Приложение В.....	115
Приложение Г	116
Приложение Д	117

Введение

Основной задачей проводимого нейтронно-физического расчёта является определение нейтронно-физических и геометрических параметров ядерного реактора и его элементарной ячейки.

Сначала проводится предварительный расчёт, в котором определяются основные геометрические параметры реактора, затем нейтронно-физический расчёт в одnogрупповом приближении, и оптимизация элементарной ячейки.

Для повышения точности расчёта можно воспользоваться многогрупповым приближением, что сделано в данной работе. Этот метод также позволяет построить распределение спектра потока нейтронов в зависимости от их энергий.

В конце расчёта определяют изменение нуклидного состава топлива во время работы реактора и кампанию топлива.

Данный расчёт может служить обоснованием конструкции данного реактора.

1 Обзор литературы

1.1 Физические особенности: реактора, топлива, замедлителя, теплоносителя и конструкционных материалов

Уран-графитовые реакторы достаточно распространены в мире так, как графит хорошо проводит тепло, имеет очень низкое сечение поглощения нейтронов, высокую термостойкость. При проектировании и эксплуатации ядерных реакторов с графитом в качестве замедлителя возникают следующие особенности:

- с графитом сочетается большое количество теплоносителей;
- выигрыш в коэффициенте воспроизводства по сравнению с ВВЭР;
- возможность функционирования системы с перегрузкой работающего реактора;
- использование натрия в качестве теплоносителя, приводит к уменьшению конструкционных материалов в активной зоне.

Недостатки графитовых реакторов:

- малая замедляющая способность приводит к большим размерам активной зоны и уменьшению теплосъема;
- при длительной работе изменяются физико-механические свойства и размеры графита, происходит накопление внутренней энергии;
- пористость графита приводит к изменению реактивности при попадании теплоносителя.

Ячейка реактора состоит из графитового замедлителя и центральной трубки рабочего канала с внутренним диаметром 30 мм. Внутри трубки располагаются сборки тепловыделяющих элементов. Каждая сборка включает 18 элементов стержневого типа. Тепловыделяющий элемент состоит топливной таблетки из МОХ-топлива и оболочки твэла из стали марки 1X18H9T. Обогащение ядерного горючего изотопом U^{235} по заданию составляет 2,4 %. Содержание оксида плутония в топливе составляет 20 %. Содержание Pu^{239} в оксиде плутония 52 %. Из-за зазора толщиной 0,01 мм, наполненного жидким

натрием, достигается хороший тепловой контакт между оболочкой и сердечником.

Конструкция твелов и ТВС обеспечивает надежную работу при высоком уровне энерговыделения и больших глубинах выгорания. Твэлы выполняют важную функцию барьеров безопасности – предотвращают выход высокоактивных продуктов деления в теплоноситель.

При выборе конструкции твэла и его размеров, необходимо учесть:

- напряженность единицы поверхности твэла;
- снижаются прочностные и вибрационные характеристики твэлов;
- поперечные размеры твэлов должны уменьшаться с увеличением температуры теплоносителя и тепловых потоков, а также с уменьшением теплопроводности топлива;
- конструкция и размеры твэлов существенно влияют на параметры размножающей среды и загрузку топлива в реактор.

Существует множество конструкций твэлов. В данной работе были выбраны твэлы стержневой формы.

Твэл состоит из оболочки, топливного сердечника. Внутри оболочки есть свободный объем.

МОКС топливо – ядерное топливо, которое содержит несколько видов оксидов делящихся материалов. В данном случае использовалось МОХ топливо с содержанием Pu239 52 % в оксиде плутония. Соотношение оксидов урана и оксида плутония 80 % к 20 % соответственно.

Длительное воздействие высоких температур и полей облучения, давления, тепловых потоков, коррозионное воздействие теплоносителя, топлива и продуктов деления негативно сказывается на работу твелов. Поэтому к ним предъявляются очень жесткие требования:

- небольшое сечение поглощения нейтронов;
- высокая механическая прочность и неизменность формы под действием температуры и радиации;
- большая теплопроводность;

– коррозионная и эрозионная стойкость в теплоносителе и совместимость с ядерным горючим.

Толщину оболочки твэл выбирают из условий обеспечения достаточной прочности.

2 Нейтронно-физический расчёт реактора

2.1 Предварительный расчет

Схема расчета реактора на тепловых нейтронах начинается с предварительной оценки размеров активной зоны, которые обеспечили бы нужный теплосъем при заданной мощности аппарата.

В гетерогенных реакторах максимально допустимая тепловая нагрузка на поверхности тепловыделяющих элементов является важным параметром, который определяет размеры активной зоны при заданном шаге решетки.

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

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

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

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

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

m – отношение высоты к диаметру, отн. ед.;

N – заданная мощность реактора, кВт;

η – коэффициент, учитывающий увеличение объема реактора вследствие размещения регулирующих стержней, коэффициент отличается от единицы, если регулирующие стержни занимают отдельные ячейки реактора, отн. ед.

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\max}} = \overline{N_0} \cdot K_V, \text{ кВт/л}, \quad (2.4)$$

где K_V – объемный коэффициент неравномерности тепловыделения, отн. ед.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

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

где Π_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛа, см;

n – число ТВЭЛов в кассете, отн. ед.;

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

Необходимая для отвода тепла скорость определяется в максимально напряженно тепловыделяющем элементе из уравнения баланса тепла:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{мн1}}}, \text{ м/с}, \quad (2.6)$$

где v – скорость теплоносителя на входе, м/с;

K_z – осевой коэффициент неравномерности, отн. ед.;

$S_{\text{мн1}}$ – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один элемент, см²;

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

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

Если теплоемкость C_p (ккал/кг·град) не зависит от температуры, то:

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

Для проведения расчета были приняты следующие величины:

Тепловая мощность	$N = 2100 \text{ МВт}$
Средняя удельная объемная нагрузка	$\bar{N}_0 = 4 \text{ кВт/л}$
Коэффициент увеличения объёма реактора за счёт СУЗ	$\eta = 1,2$
Отношение высоты к диаметру	$m = 0,7$
Объемный коэффициент неравномерности	$K_V = 2,5$
Осевой коэффициент неравномерности	$K_z = 1,35$
Размер ячейки под ключ	25 см
Число твэлов в кассете	102
Радиус топливной таблетки	0,575 см
Радиус наружной оболочки твэл	0,685 см
Радиус внутренней оболочки твэл	0,585 см

Значения исходных параметров $\bar{N}_0$ и m были выбраны произвольно.

Объем активной зоны:

$$V_{a.z.} = \frac{N}{\bar{N}_0} \cdot \eta = \frac{2100 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,2 = 0,63 \cdot 10^9 \text{ см}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{a.z.} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{a.z.}}{\pi \cdot m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,63 \cdot 10^9}{3,14 \cdot 0,7}} = 1046,45 \text{ см.}$$

Высота активной зоны:

$$H_{a.z.} = m \cdot D_{a.z.} = 0,7 \cdot 1046,45 = 732,5 \text{ см.}$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = \bar{N}_0 \cdot K_V = 4 \cdot 2,5 = 10 \text{ кВт/см}^3.$$

Площадь сечения ячейки:

$$S_{яч} = a_{яч}^2 = 625 \text{ см}^2,$$

где $a_{яч}$ – размер ячейки «под ключ», см.

Периметр тепловыделяющей поверхности твэла:

$$P_0 = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 1,37 = 4,3 \text{ см.}$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{0,116 \cdot P_0 \cdot n} = \frac{10 \cdot 625}{116 \cdot 4,3 \cdot 18} = 0,695 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

$$\Delta i = C_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,151 \cdot (284 - 250) = 39,16 \text{ ккал/кг.}$$

Площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на 1 элемент:

$$S_{\text{мн}_1} = \frac{S_{\text{т.к.нут.}} - (n+1) \cdot S_{\text{твэл}}}{n+1} = \frac{60,79 - 19 \cdot 1,47}{19} = 1,73 \text{ см}^2;$$

$$\nu = \frac{q_{\max} \cdot P_0 \cdot H_{\text{аз}}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot S_{\text{менл.}} \cdot i} = \frac{0,695 \cdot 4,3 \cdot 1003,55}{3,6 \cdot 1,35 \cdot 0,976 \cdot 1,73 \cdot 39,16} = 9,36 \text{ м/с.}$$

Таким образом, получившаяся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет установленным требованиям для легких металлов ($\nu < 10 \text{ м/с}$).

2.2 Расчет концентраций

Поскольку ячейка реактора состоит из нескольких зон с различными ядерными свойствами, необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, коэффициенты диффузии, замедляющие свойства) для каждой зоны (топливо – МОХ, оболочка – нержавеющая сталь, теплоноситель – натрий замедлитель – графит).

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

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

где ρ – плотность вещества, г/см³;

A – атомный вес элемента.

2.2.1 Расчет концентрации топлива

Топливом является МОХ топливо ($\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$), содержание Pu^{239} в оксиде плутония 20 %, обогащенное по U^{235} на 2,4 %, поэтому ядерная концентрация топлива рассчитывается следующим образом:

$$N_{\text{U}^{235}} = \frac{N_A \cdot \rho_{\text{MOX}} \cdot C_{235}}{A_{\text{MOX}}} =$$
$$= \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,2 \cdot 0,024}{235 \cdot 0,024 + 238 \cdot (1 - 0,024 - 0,2) + 239 \cdot 0,2 + 32} = 5,46 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{\text{U}^{238}} = \frac{N_A \cdot \rho_{\text{MOX}} \cdot C_{238}}{A_{\text{MOX}}} =$$
$$= \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,2 \cdot (1 - 0,024 - 0,2)}{235 \cdot 0,024 + 238 \cdot (1 - 0,024 - 0,2) + 239 \cdot 0,2 + 32} = 1,77 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{\text{Pu}^{239}} = \frac{N_A \cdot \rho_{\text{MOX}} \cdot C_{239}}{A_{\text{MOX}}} =$$
$$= \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,2 \cdot 0,2}{235 \cdot 0,024 + 238 \cdot (1 - 0,024 - 0,2) + 239 \cdot 0,2 + 32} = 4,55 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

$$N_{\text{O}} = \frac{N_A \cdot \rho_{\text{MOX}} \cdot 2}{A_{\text{MOX}}} =$$
$$= \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,2 \cdot 2}{235 \cdot 0,024 + 238 \cdot (1 - 0,024 - 0,2) + 239 \cdot 0,2 + 32} = 4,55 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

2.2.2 Расчет концентрации теплоносителя

Теплоносителем в данном ядерном реакторе служит натрий.

$$N_{\text{Na}} = \frac{N_a \cdot \rho_{\text{Na}}}{A_{\text{Na}}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,968}{23} = 5,07 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3.$$

2.2.3 Расчет концентрации оболочки

Оболочка ТВЭЛОВ и кассет – сталь IX18N9T. Состав стали: железо 70,7%; хром 18%; никель – 9%; титан – 0,8%; марганец – 1,5%. Плотность стали – 7,95 г/см³. ;Вычисление концентраций производится следующим образом:

$$N_{Fe} = C_{Fe} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{Fe}} = 0,707 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{56} = 6,1 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Cr} = C_{Cr} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{Cr}} = 0,18 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{52} = 1,55 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Ni} = C_{Ni} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{Ni}} = 0,09 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{59} = 7,77 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Ti} = C_{Ti} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{Ti}} = 0,008 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{48} = 6,9 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Mn} = C_{Mn} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{Mn}} = 0,015 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95}{55} = 1,29 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

2.2.4 Доли материалов в ячейке

Площадь сечения топлива определяется по формуле:

$$S_{топ} = n \cdot S_{топ.таб.} = n \cdot \pi \cdot \frac{D_{серед}^2}{4} = 18 \cdot 3,14 \cdot 0,4^2 = 9,05 \text{ см}^2.$$

Площадь сечения прохода теплоносителя:

$$S_{тин} = \pi \cdot (R_{тквнутр}^2 - R_{твэлвнешн}^2 \cdot n_{твэлов}) = 3,14 \cdot (3^2 - 0,505^2 \cdot 18) = 13,85 \text{ см}^2.$$

Площадь конструкционных материалов:

$$S_{км} = \pi \cdot (R_{тквнешн}^2 - R_{тквнутр}^2) + n_{твэлов} \cdot (R_{твэлвнешн}^2 - R_{твэлвнутр}^2) = \\ = 3,14 \cdot (3,4^2 - 3^2) + 18 \cdot (0,505^2 \cdot 0,41^2) = 12,96 \text{ см}^2.$$

2.3 Расчет микросечений и макросечений для «холодного» реактора

Необходимость обработки сечений связана с тем, что их значения, приведенные в справочниках, относятся к энергии нейтронов $E = 0,025$ эВ соответствующей при распределении нейтронов по спектру Максвелла наиболее вероятной скорости $v = 2200$ м/с.

При физико-нейтронных расчетах все поперечные сечения должны быть отнесены к средней скорости нейтронов. Следует отметить, что Максвелловский спектр тепловых нейтронов постепенно переходит в спектр замедляющихся нейтронов при температуре 293 К при энергии примерно равной $E = 0,2$ эВ, которая называется «энергией сшивки».

В реальных средах распределение тепловых нейтронов не совпадает в точности с распределением Максвелла, поскольку имеет место поглощение тепловых нейтронов (спектр сдвинут в область больших энергий).

Для удобства расчетов в теории реакторов принято, что тепловые нейтроны распределены по спектру Максвелла, но имеют более высокую эффективную температуру (температура нейтронного газа – $T_{н.г.}$), которая превышает температуру замедлителя.

Поперечные сечения поглощения и деления, отнесенные к средней скорости тепловых нейтронов, определяются по формуле:

$$\sigma_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,886 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}; \quad (2.9)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f_0} \cdot 0,886 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \quad (2.10)$$

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

f_a, f_f – поправочный коэффициент f , учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона $\frac{1}{v^2}$.

В тепловых реакторах температура нейтронного газа превышает температуру среды на 50 – 100 градусов.

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

$$\Sigma_i = \sigma_i \cdot N_i. \quad (2.11)$$

Замедляющую способность вещества можно оценить по соотношению:

$$\xi \Sigma_{s_i} = \sum_{i=1}^m \xi_i \cdot \Sigma_{s_i}, \quad (2.12)$$

где ξ_i – логарифмический декремент, $\xi_i = \frac{2}{A_i + \frac{2}{3}}$.

2.3.1 Микросечения и макросечения для U^{235}

Произведем расчет сечений для температуры нейтронного газа равной 400 К.

$f_a = 0,96$ – поправочный коэффициент для U^{235} .

$f_f = 0,96$ – поправочный коэффициент для U^{235} .

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

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

Тогда, с учетом поправок, сечения для U^{235} пересчитываются по формулам (2.9) и (2.10):

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,886 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{477}} = 454,27 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,886 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{477}} = 582 \text{ барн};$$

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

$$\mu_s^{U^{235}} = 0; \sigma_{tr}^{U^{235}} = 454,27 + 15 \cdot (1 - 0) = 469,275 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 454,27 \cdot 5,458 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-24} = 0,248 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 15 \cdot 5,46 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-24} = 0,211 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 5,46 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-24} = 0,0082 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 436,275 \cdot 5,46 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-24} = 0,256 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент:

$$\xi^{U^{235}} = 0,0084.$$

Замедляющая способность:

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 0,0084 \cdot 0,0082 = 6,88 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.2 Микросечения и макросечения для U^{238}

$f_a = 1$ – поправочный коэффициент для U^{238} .

$\sigma_{a_0} = 2,71$ барн – табличное значение сечения поглощения U^{238} .

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,886 \cdot \sqrt{\frac{293}{477}} = 1,877 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{238}} = 0 \text{ барн};$$

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

$$\mu_s^{U^{238}} = 0; \sigma_{tr}^{U^{238}} = 11,71 + 9 \cdot (1 - 0) = 10,877 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{U^{238}} = 1,877 \cdot 1,76 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,033 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{238}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{238}} = 9 \cdot 1,76 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,158 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{238}} = 10,88 \cdot 1,76 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,192 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент:

$$\xi^{U^{238}} = 0,0084.$$

Замедляющая способность:

$$\xi \Sigma_s^{U^{238}} = 0,0084 \cdot 0,158 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.3 Микросечения и макросечения для Pu^{239}

$f_a = 0,96$ – поправочный коэффициент для Pu^{239} .

$\sigma_{a_0} = 1028$ барн – табличное значение сечения поглощения Pu^{239} .

$$\sigma_a^{Pu^{239}} = 1028 \cdot 0,886 \cdot \sqrt{\frac{293}{477}} \cdot 0,96 = 683,74 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{Pu^{239}} = 742 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{477}} \cdot 0,96 = 493,52 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{Pu^{239}} = 9,5 \text{ барн};$$

$$\mu_s^{Pu^{239}} = 0; \quad \sigma_{tr}^{Pu^{239}} = 683,74 + 9,5 \cdot (1 - 0) = 693,24 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{Pu^{239}} = 683,74 \cdot 4,55 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-24} = 3,11 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{Pu^{239}} = 493,52 \cdot 4,55 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-24} = 2,24 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{Pu^{239}} = 9,5 \cdot 4,55 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-24} = 0,043 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Pu^{239}} = 693,24 \cdot 4,55 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-24} = 3,15 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент:

$$\xi^{Pu^{239}} = 0,0083.$$

Замедляющая способность:

$$\xi \Sigma_s^{Pu^{239}} = 0,0083 \cdot 0,043 = 3,58 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.4 Микросечения и макросечения для O^{16}

$$\sigma_a^{O^{16}} = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{O^{16}} = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{O^{16}} = 3,75 \text{ барн};$$

$$\mu_s^{O^{16}} = 0,04; \sigma_{tr}^{O^{16}} = 0 + 3,75 \cdot (1 - 0,04) = 3,6 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{O^{16}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{O^{16}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{O^{16}} = 3,75 \cdot 10^{-24} \cdot 4,56 \cdot 10^{22} = 0,170 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{O^{16}} = 3,6 \cdot 10^{-24} \cdot 4,56 \cdot 10^{22} = 0,164 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент:

$$\xi^{O^{16}} = 0,12.$$

Замедляющая способность:

$$\xi \Sigma_s^{O^{16}} = 0,12 \cdot 0,170 = 2,046 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.5 Макросечения для МОХ топлива.

$$\Sigma_a^{MOX} = \Sigma_a^{U^{235}} + \Sigma_a^{U^{238}} + \Sigma_a^{Pu^{239}} + \Sigma_a^{O^{16}} = 0,248 + 0,033 + 3,11 + 0 = 3,39 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{MOX} = \Sigma_f^{U^{235}} + \Sigma_f^{U^{238}} + \Sigma_f^{Pu^{239}} + \Sigma_f^{O^{16}} = 0,211 + 0 + 2,24 + 0 = 2,45 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{MOX} = \Sigma_s^{U^{235}} + \Sigma_s^{U^{238}} + \Sigma_s^{Pu^{239}} + \Sigma_s^{O^{16}} = 0,0082 + 0,158 + 0,043 + 0,17 = 0,379 \text{ см}^{-1};$$

1;

$$\Sigma_{tr}^{MOX} = \Sigma_{tr}^{U^{235}} + \Sigma_{tr}^{U^{238}} + \Sigma_{tr}^{Pu^{239}} + \Sigma_{tr}^{O^{16}} = 0,256 + 0,192 + 3,15 + 0,164 = 3,76 \text{ см}^{-1};$$

$$\begin{aligned} \xi \Sigma_s^{MOX} &= \xi \Sigma_s^{U^{235}} + \xi \Sigma_s^{U^{238}} + \xi \Sigma_s^{Pu^{239}} + \xi \Sigma_s^{O^{16}} = \\ &= 6,88 \cdot 10^{-5} + 1,3 \cdot 10^{-3} + 3,58 \cdot 10^{-4} + 2,046 \cdot 10^{-2} = 0,022 \text{ см}^{-1}. \end{aligned}$$

2.3.6 Микросечения и макросечения для хрома

$f_a = 1$ – поправочный коэффициент для Cr^{52} .

$$\sigma_a^{Cr^{52}} = 3,1 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{477}} = 2,15 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{Cr^{52}} = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{Cr^{52}} = 4,2 \text{ барн};$$

$$\mu_s^{Cr^{52}} = 0,01; \sigma_{tr}^{Cr^{52}} = 2,15 + 4,2 \cdot (1 - 0,01) = 6,306 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{Cr^{52}} = 2,15 \cdot 1,55 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,033 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{Cr^{52}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{Cr^{52}} = 4,2 \cdot 1,55 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,065 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Cr^{52}} = 6,3 \cdot 1,55 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,098 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент:

$$\xi^{Cr^{52}} = 3,85 \cdot 10^{-2}.$$

Замедляющая способность:

$$\xi \Sigma_s^{Cr^{52}} = 3,85 \cdot 10^{-2} \cdot 0,065 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.7 Микросечения и макросечения для никеля

$f_a = 1$ – поправочный коэффициент для Ni^{59} .

$$\sigma_a^{Ni^{59}} = 4,6 \cdot 0,886 \cdot \sqrt{\frac{293}{477}} = 3,187 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{Ni^{59}} = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{Ni^{59}} = 17 \text{ барн};$$

$$\mu_s^{Ni^{59}} = 0,01; \sigma_{tr}^{Ni^{59}} = 3,187 + 17 \cdot (1 - 0,01) = 20,017 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{Ni^{59}} = 3,187 \cdot 7,768 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-24} = 0,0248 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{Ni^{59}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{Ni^{59}} = 17 \cdot 7,768 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-24} = 0,132 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Ni^{59}} = 20,02 \cdot 7,768 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-24} = 0,155 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент:

$$\xi^{Ni^{59}} = 3,35 \cdot 10^{-2}.$$

Замедляющая способность:

$$\xi \Sigma_s^{Ni^{59}} = 3,35 \cdot 10^{-2} \cdot 0,132 = 4,42 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.8 Микросечения и макросечения для железа

$f_a = 1$ – поправочный коэффициент для Fe^{56} .

$$\sigma_a^{Fe^{56}} = 2,53 \cdot 0,886 \cdot \sqrt{\frac{293}{477}} = 1,75 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{Fe^{56}} = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{Fe^{56}} = 11,4 \text{ барн};$$

$$\mu_s^{Fe^{56}} = 0,01; \sigma_{tr}^{Fe^{56}} = 1,75 + 11,4 \cdot (1 - 0,01) = 13,04 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{Fe^{56}} = 1,75 \cdot 6,1 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,107 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{Fe^{56}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{Fe^{56}} = 11,4 \cdot 6,1 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,696 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Fe^{56}} = 13,04 \cdot 6,1 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,796 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент:

$$\xi^{Fe^{56}} = 3,53 \cdot 10^{-2}.$$

Замедляющая способность:

$$\xi \Sigma_s^{Fe^{56}} = 3,53 \cdot 10^{-2} \cdot 0,696 = 2,46 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.9 Расчет макросечения для нержавеющей стали

$$\Sigma_a^{Стали} = \Sigma_a^{Fe^{56}} + \Sigma_a^{Cr^{52}} + \Sigma_a^{Ni^{59}};$$

$$\Sigma_a^{Стали} = 0,107 + 0,033 + 0,0248 = 0,1648 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{Стали} = \Sigma_f^{Fe^{56}} + \Sigma_f^{Cr^{52}} + \Sigma_f^{Ni^{59}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{Стали} = \Sigma_s^{Fe^{56}} + \Sigma_s^{Cr^{52}} + \Sigma_s^{Ni^{59}};$$

$$\Sigma_s^{Стали} = 0,696 + 0,065 + 0,132 = 0,893 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Стала} = \Sigma_{tr}^{Fe^{56}} + \Sigma_{tr}^{Cr^{52}} + \Sigma_{tr}^{Ni^{59}};$$

$$\Sigma_{tr}^{Стали} = 0,796 + 0,098 + 0,155 = 1,049 \text{ см}^{-1}.$$

Замедляющая способность:

$$\xi \Sigma_s^{Стали} = \xi \Sigma_s^{Fe^{56}} + \xi \Sigma_s^{Cr^{52}} + \xi \Sigma_s^{Ni^{59}};$$

$$\xi \Sigma_s^{Стали} = 2,46 \cdot 10^{-2} + 2,5 \cdot 10^{-3} + 4,42 \cdot 10^{-3} = 3,15 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.10 Макросечения для Na^{23}

$$\Sigma_a^{Na} = 0,018 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{Na} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{Na} = 0,157 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Na} = 0,171 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s^{Na} = 0,0133 \text{ см}^{-1}.$$

2.3.11 Макросечения для C^{12}

$$\Sigma_a^C = 0,00023 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^C = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^C = 4,42 \cdot 8,28 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,389 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^C = 4,42 \cdot 8,28 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-24} = 0,366 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s^C = 0,158 \cdot 0,389 = 0,061 \text{ см}^{-1}.$$

2.4 Расчет коэффициента размножения для «холодного» реактора

2.4.1 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды

Коэффициент размножения бесконечной среды является важной характеристикой активной зоны реактора, т. к. по его величине можно судить о целесообразности продолжения расчёта.

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется как произведение четырёх сомножителей:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta, \quad (3.1)$$

где μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;
 φ – вероятность избежать резонансного захвата;
 θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;
 η – коэффициент выхода нейтронов на один акт поглощения.

2.4.2 Расчет коэффициента выхода нейтронов на одно поглощение

Согласно определению η – коэффициент, характеризующий количество вторичных нейтронов деления, приходящихся на один поглощенный топливом первичный тепловой нейтрон. Выражение для η , когда топливо применяется в виде сплава или химического соединения, имеет вид:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_f^{mon}}{\Sigma_a^{mon}}, \quad (3.2)$$

где ν_f – число нейтронов, которое испускается при одном акте деления.

$$\eta = 2,87 \cdot \frac{2,456}{3,39} = 2,078.$$

2.4.3 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах ε – величина, которая характеризует увеличение числа нейтронов за счет деления быстрыми нейтронами.

В реакторах на тепловых нейтронах основное значение имеет деление под действием тепловых нейтронов. Вклад в деление на быстрых нейтронах имеет вспомогательное значение. Этот вклад был впервые оценен при создании гетерогенных реакторах на природном уране.

Коэффициент размножения в них незначительно превышал единицу, поэтому увеличение ε на несколько процентов за счет деления быстрыми нейтронами имеет существенное значение. Для расчета ε в тесных решетках можно пользоваться эмпирической формулой Батя-Цыганкова:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{бл}} + \frac{\varepsilon_{\infty} - \varepsilon_{\text{бл}}}{1 + 2,3 \frac{N_H}{N_8}}, \quad (3.3)$$

где $\varepsilon_{\infty} = 1,19$;

$\frac{N_H}{N_8}$ – отношение числа атомов водорода к числу атомов урана в активной зоне;

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

Уран-водное отношение N_H/N_8 найдем следующим образом:

$$\mu_1 = \frac{N_8}{N_{08}} = \frac{1,76 \cdot 10^{22} \cdot 238}{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 19,05 \cdot 0,982} = 0,37; \quad (3.4)$$

где P – вероятность того, что быстрый нейтрон испытывает какое-либо столкновение с ядром U^{238} (определяется из графической зависимости и зависит от геометрических размеров и формы топливного блока);

μ_1 – пористость блока по U^{238} ;

Для $R_{серд} = 0,4$ см, $P = 0,1$:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \cdot \mu_1 = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} = 1,003.$$

2.4.4 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов

Коэффициент использования тепловых нейтронов θ – это вероятность для теплового нейтрона поглотиться в топливе, т.к. все рабочие каналы содержат сборки твэл, то можно использовать способ гомогенизации, при котором все материалы рабочего канала считают равномерно перемешанными.

Реальная ячейка заменяется эквивалентной ячейкой с одним фиктивным цилиндрическим блоком. Фиктивный блок образуется путем гомогенизации ядерного горючего, конструкционных материалов.

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

$$\frac{1}{\theta'_{ф.б.}} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \Sigma_{a_{зам}}}{S_{ф.б.} \cdot \Sigma_{a_{ф.б.}}} + (E - 1). \quad (3.7)$$

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования:

$$F = \frac{\bar{\Phi}_{зам}}{\bar{\Phi}_{ф.б.}} = \frac{1}{2} \frac{R_{ф.б.}}{L_{ф.б.}} \frac{I_0\left(\frac{R_{ф.б.}}{L_{ф.б.}}\right)}{I_1\left(\frac{R_{ф.б.}}{L_{ф.б.}}\right)}. \quad (3.8)$$

I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков.

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

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{R_{зам}}{R_{ф.б.}}\right) - 0,75\right). \quad (3.9)$$

Затем рассчитывают коэффициент использования тепловых нейтронов по формуле:

$$\theta = \theta'_{\phi.\delta.} \cdot \theta_0, \quad (3.10)$$

где θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока.

$$\theta_0 = \frac{S_{mon} \cdot \Sigma_{a_{mon}}}{S_{\phi.\delta.} \cdot \Sigma_{a_{\phi.\delta.}}}. \quad (3.11)$$

Параметры необходимые для расчёта:

$$R_{зам} = \sqrt{\frac{S_{яч}}{\pi}} = \sqrt{\frac{625}{3,14}} = 14,1 \text{ см};$$

$$R_{\phi} = R_{TK} = 3,4 \text{ см}.$$

Сечения, усредненные по фиктивному блоку:

$$\Sigma_{a_{\phi.\delta.}} = \frac{1}{S_{\phi.\delta.}} \cdot \sum_{i=1}^m \Sigma_{a_{\phi.\delta.}} \cdot S_i = \frac{\Sigma_{a_{mon}} \cdot S_{mon} + \Sigma_{a_{к.м.}} \cdot S_{к.м.} + \Sigma_{a_{тепл}} \cdot S_{тепл}}{S_{\phi.\delta.}};$$

$$\Sigma_{a_{\phi.\delta.}} = \frac{3,39 \cdot 9,05 + 0,1648 \cdot 12,96 + 0,018 \cdot 13,85}{36,32} = 0,91 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr_{\phi.\delta.}} = \frac{1}{S_{\phi.\delta.}} \cdot \sum_{i=1}^m \Sigma_{tr_{\phi.\delta.}} \cdot S_i = \frac{\Sigma_{tr_{mon}} \cdot S_{mon} + \Sigma_{tr_{к.м.}} \cdot S_{к.м.} + \Sigma_{tr_{тепл}} \cdot S_{тепл}}{S_{\phi.\delta.}};$$

$$\Sigma_{tr_{\phi.\delta.}} = \frac{3,76 \cdot 9,05 + 1,049 \cdot 12,96 + 0,171 \cdot 13,85}{36,35} = 1,38 \text{ см}^{-1}.$$

С помощью усреднённых сечений по фиктивному блоку длина диффузии определяется:

$$L_{\phi.\delta.} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{a_{\phi.\delta.}} \cdot \Sigma_{tr_{\phi.\delta.}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,91 \cdot 1,38}} = 0,515 \text{ см};$$

$$L_{зам} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{a_{зам}} \cdot \Sigma_{tr_{зам}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,00023 \cdot 0,366}} = 62,93 \text{ см};$$

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}} \right)^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{R_{зам}}{R_{\phi.\delta.}} \right) - 0,75 \right);$$

$$(E-1) = 0,5 \cdot \left(\frac{14,1}{62,93} \right)^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{14,1}{0,515} \right) - 0,75 \right) = 0,064;$$

$$F = \frac{\overline{\Phi}_{\text{зам}}}{\overline{\Phi}_{\text{ф.б.}}} = \frac{1}{2} \frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}} \frac{I_0 \left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}} \right)}{I_1 \left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}} \right)};$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{3,4}{0,51} \cdot \frac{I_0 \left(\frac{3,4}{0,51} \right)}{I_1 \left(\frac{3,4}{0,51} \right)} = 3,46;$$

$$\frac{1}{\theta'_{\text{ф.б.}}} = 1 + F \cdot \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_{\text{а зам}}}{S_{\text{ф.б.}} \cdot \Sigma_{\text{а ф.б.}}} + (E-1);$$

$$\frac{1}{\theta'_{\text{ф.б.}}} = 1 + 3,46 \cdot \frac{588,68 \cdot 0,00023}{36,32 \cdot 0,91} + 0,064 = 1,078, \text{ тогда } \theta'_{\text{ф.б.}} = 0,93;$$

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{\text{а топл}} \cdot S_{\text{топл}}}{\Sigma_{\text{а ф}} \cdot S_{\text{ф}}} = \frac{3,39 \cdot 9,05}{0,91 \cdot 36,32} = 0,93.$$

Подставив $\theta'_{\text{ф.б.}}$ и θ_0 в формулу (2.22) коэффициент использования тепловых нейтронов равен:

$$\theta = 0,93 \cdot 0,93 = 0,86.$$

2.4.5 Вероятность избежать резонансного захвата

Вероятность избежать резонансного захвата – это доля нейтронов, не поглотившихся при замедлении. В энергетических ядерных реакторах, как правило, применяются сборки твэлов, которые состоят из нескольких блоков ядерного горючего. Для ячейки со стрежневыми блоками коэффициент φ рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \exp \left(- \frac{K_T \cdot R_U \cdot \sqrt{R \cdot n \cdot \mu_1} + 0,73 \cdot n \cdot R_U^2 \cdot \mu_1}{\xi \Sigma_{\text{с гет С}} \cdot S_{\text{С}} + \xi \Sigma_{\text{с ф}} \cdot S_{\text{ф}}} \right), \quad (3.12)$$

где k_T – температурный коэффициент;

μ_1 – пористость блока по U^{238} ;

R_U – радиус уранового блока, см;

R – радиус пучка ТВЭЛОВ, см;

n – число ТВЭЛОВ;

$\xi\Sigma_{s_{зам}}$ и $\xi\Sigma_{s_{ф.б.}}$ – замедляющая способность замедлителя и фиктивного блока соответственно.

Коэффициент k_T вычисляется по формуле:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_{мон}}). \quad (3.13)$$

При температуре $T = 377$ К температурный коэффициент равен:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{377}) = 1,038;$$

$$\xi\Sigma_{s_{ф.б.}} = \frac{S_{монл.} \cdot \xi\Sigma_{монл.} + S_{зам.} \cdot \xi\Sigma_{зам.} + S_{об.} \cdot \xi\Sigma_{об.}}{S_{ф.б.}};$$

$$\xi\Sigma_{s_{ф.б.}} = \frac{9,05 \cdot 0,022 + 588,68 \cdot 0,061 + 12,96 \cdot 0,0315}{36,32} = 1,005 \text{ см}^{-1};$$

$$\varphi = \exp\left(-\frac{1,038 \cdot 0,4 \cdot \sqrt{18 \cdot 0,4 \cdot 0,37} + 0,73 \cdot 18 \cdot 0,4^2 \cdot 0,37}{6,1 \cdot 10^{-2} \cdot 588,68 + 1,005 \cdot 36,32}\right) = 0,928.$$

Подставив найденные значения коэффициентов μ , φ , θ , η в формулу четырех сомножителей, найдём коэффициент размножения для бесконечной среды:

$$k_{\infty} = 1,003 \cdot 0,928 \cdot 0,86 \cdot 2,078 = 1,66.$$

2.4.6 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения вычисляется:

$$k_{эф} = \frac{k_{\infty} \cdot \exp(-B^2 \cdot \tau_p)}{1 + B^2 \cdot L_p^2}, \quad (4.1)$$

где L_p^2 – квадрат длины диффузии в решетке;

τ_p – возраст нейтронов в решётке;

B^2 – геометрический параметр.

Квадрат длины диффузии в решетке рассчитывается по формуле:

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

$$L_p^2 = 62,98^2 \cdot (1 - 0,86) + 0,515^2 \cdot 0,86 = 555,54 \text{ см}^2.$$

Так как объем ядерного горючего, теплоносителя и конструкционных материалов составляет заметную долю в объеме активной зоны, то возраст нейтронов оценивается по приближенной формуле:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^2, \quad (4.2)$$

где $\tau_{зам} = 352 \text{ см}^2$ – возраст нейтронов в замедлителе.

$$\tau_p = 352 \cdot \left(\frac{625}{588,68} \right)^2 = 396,77 \text{ см}^2.$$

Для реактора с отражателем в случае применения формулы (4.3) необходимо учитывать эффективные добавки за счет отражателя (δ). Так, для цилиндрического реактора:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H_э} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R_э} \right)^2 = \left(\frac{3,14}{732,5 + 2 \cdot 58} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{\frac{1046,45}{2} + 58} \right)^2 = 3,08 \cdot 10^{-5}, \quad (4.3)$$

где $H_э, R_э$ – эквивалентные размеры реактора, см;

δ – эффективная добавка за счет отражателя, см.

Экстраполированные размеры реактора рассчитываются по формулам:

$$H_э = H_{a.з.} + 2\delta \text{ см}; \quad (4.4)$$

$$R_э = R_{a.з.} + \delta \text{ см}. \quad (4.5)$$

Для водо-водяных реакторов с натриевым отражателем:

$$\delta = 1,2 \cdot L_{зам} \cdot \text{tgh}(l_{отп} - L_{зам}) \text{ см}, \quad (4.6)$$

где M^2 – площадь миграции отражателя, см^2 .

Подставив численные величины в формулы (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), значения искомых параметров равны:

$$M_{\text{отр}}^2 = 3110 \text{ см}^2;$$

$$\delta = 1,2 \cdot \sqrt{2758} \cdot \text{tgh} \left(1,5 \cdot \sqrt{\left(\frac{3110}{2758} \right)} \right) = 58 \text{ см};$$

$$H_y = 732,5 + 2 \cdot 58 = 848,5 \text{ см};$$

$$R_y = \frac{1046,45}{2} + 58 = 581,22 \text{ см};$$

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{848,5} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{581,22} \right)^2 = 3,08 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}.$$

Подставив полученные значения в формулу определим эффективный коэффициент размножения:

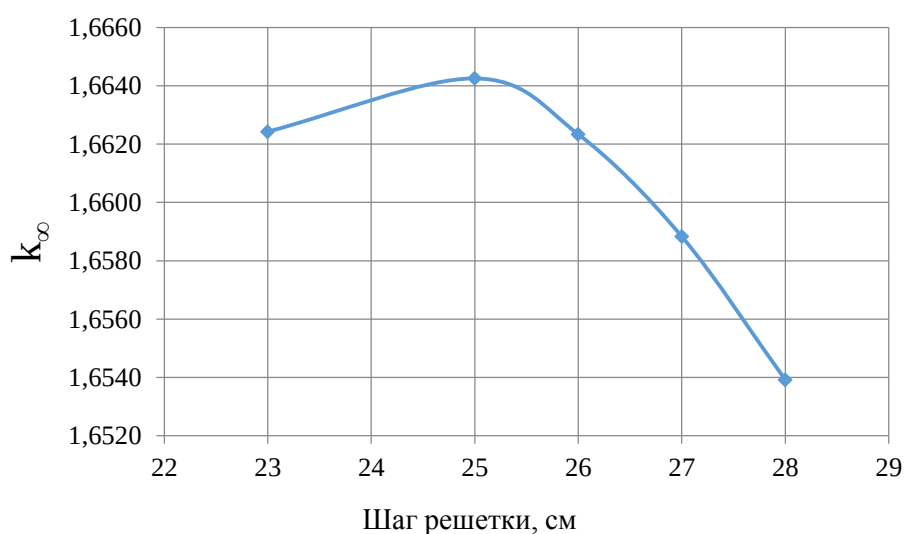
$$k_{\text{эф}} = \frac{1,66 \cdot \exp(-3,08 \cdot 10^{-5} \cdot 396,77)}{1 + 209,37 \cdot 3,08 \cdot 10^{-5}} = 1,633.$$

2.5 Оптимизация параметров ячейки

Оптимизация параметров ячейки производится для нахождения наибольшего эффективного коэффициента размножения, производится в 2 этапа. На первом этапе изменяется шаг решётки при постоянном диаметре твэла. Полученные данные в ходе 1-го шага оптимизации приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Изменение размера под ключ

Параметр	Значение				
Шаг решетки, см	23	25	26	27	28
Внешний радиус твэла, см	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505
Радиус топливной табл., см	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
k_{∞}	1,6624	1,6643	1,6623	1,6588	1,6539

Рисунок 2.1 – Зависимость k_{∞} от размера ячейки под ключ

На втором этапе оптимизации при оптимальном значении размера шага решетки изменяется внешний диаметр твэла, изменяя тем самым и диаметр топливной таблетки. Данные полученные в этом шаге оптимизации приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Изменение внешнего диаметра твэла

Параметр	Значение				
Шаг решетки, см	25	25	25	25	25
Внешний радиус твэла, см	0,355	0,405	0,455	0,505	0,555
Радиус топливной табл., см	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
k_{∞}	1,6302	1,6729	1,6819	1,6643	1,6209

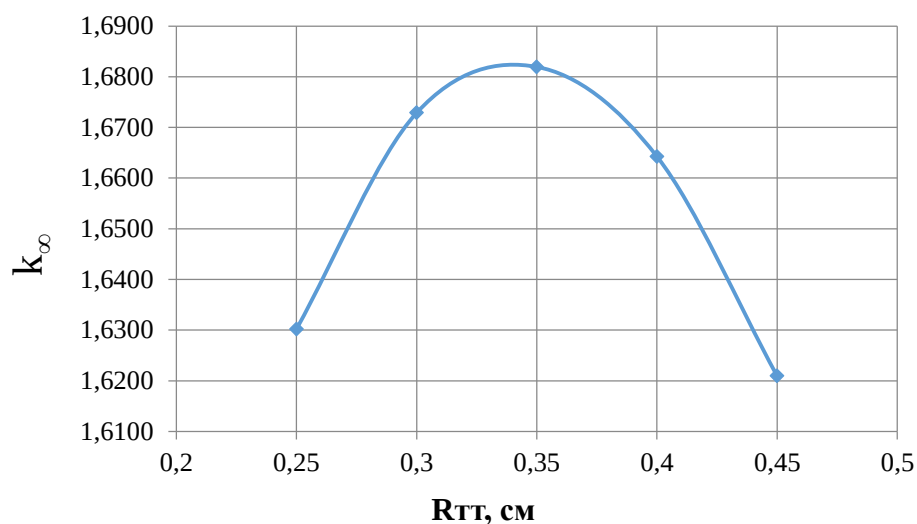


Рисунок 2.2 – Зависимость k_{∞} от внешнего диаметра твэла

Оптимальными параметрами принимаются параметры при которых эффективный коэффициент размножения будет максимальным и приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Оптимальные параметры ячеек

Шаг решетки, см	25
Внешний радиус твэла, см	0,455
Радиустопливной табл., см	0,35
k_{∞}	1,682

2.6 Расчет ядерно-физических характеристик «горячего» реактора

Повышение температуры всех материалов активной зоны, отражателя и корпуса реактора происходит в течении работы реактора [2].

Уменьшается сечение поглощения и деления тепловых нейтронов вследствие повышения температура нейтронного газа. Повышение температуры приводит и к уменьшению плотности, что приводит к уменьшению макроскопических сечений.

Так же происходит смещение энергии «сшивки» спектров тепловых и замедляющихся нейтронов в область больших энергий. Что приводит к уменьшению возраста тепловых нейтронов.

Повышение температуры ядерного горючего приводит к уширению резонансных пиков (эффект Доплера).

Все это приводит к изменению реактивности реактора.

2.6.1 Температурные эффекты реактивности

При работе реактора происходит существенное повышение температуры всех материалов активной зоны, отражателя и корпуса реактора. Из-за этого повышается температура нейтронного газа, что приводит к уменьшению сечений поглощения и деления тепловых нейтронов. Также повышение температуры нейтронного газа вызывает смещение энергии «сшивки» в область больших энергий, что приводит к уменьшению возраста тепловых нейтронов. Кроме того, повышение температуры ядерного горючего приводит к уширению резонансов. Все эти факторы приводят к изменению реактивности реактора.

Для расчета реактора при рабочей температуре нужно найти эффективную температуру нейтронов и соответствующие ей новые значения сечений. Эффективная температура нейтронного газа определяется по формуле:

$$T_{н.г.}^{эфф} = T_{зам} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{\overline{\Sigma_{a_{яч}}}}{\xi \Sigma_{s_{яч}}} \right), \text{ К.} \quad (6.1)$$

Сечения $\Sigma_{a_{яч}}$ и $\xi \Sigma_{s_{яч}}$ берутся при температуре замедлителя, которая определяется по формуле:

$$T_{зам} = 900 \text{ К.}$$

С учетом долей материалов и сечений, получаем отношение усредненных сечений по ячейке:

$$\frac{\Sigma_{a_{яч}}}{\xi \Sigma_{s_{яч}}} = 0,638.$$

Тогда температура нейтронного газа, определяемая по формуле (6.1), равна:

$$T_{н.г.}^{эфф} = 900 \cdot (1 + 1,4 \cdot 0,638) = 1704 \text{ К.}$$

Точка пересечения спектров Ферми и Максвелла определяется как отношение макросечения поглощения к замедляющей способности:

$$f_{zp}(\chi_{zp}) = \frac{\overline{\Sigma_{a_{яч}}}}{\xi \Sigma_{a_{яч}}} = 0,638.$$

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

$$f_{zp}(\chi_{zp}) = \frac{\chi_{гр}^2 e^{-\chi_{гр}}}{1 - (1 + \chi_{гр}) e^{-\chi_{гр}}} = \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s}. \quad (6.2)$$

Найденной величине $f_{zp}(\chi_{zp})$ соответствует $\chi_{гр} = 2,75$. Тогда из графика

$$F_{zp}(\chi_{zp}) \Big|_{\chi_{zp}=2,75} = 1,2.$$

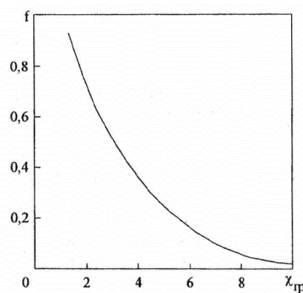


Рисунок 4 – Определение верхней границы тепловой группы

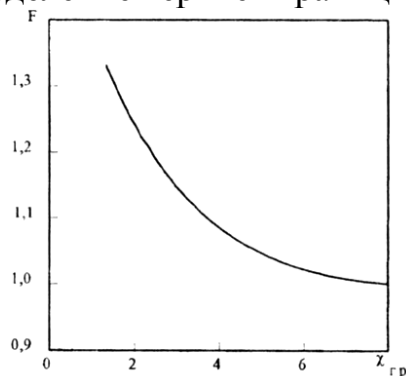


Рисунок 5 – Усредненное сечение поглощения по спектру Максвелла

Сечения поглощения и рассеяния берутся при температуре замедлителя.

Сечения при температуре нейтронного газа определяются следующим образом:

Сечения при температуре нейтронного газа горячего реактора:

$$\sigma_{a,f}(T_{\text{н.г.}}) = 0,886 \cdot \sigma_{a,f} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{н.г.}}}} \cdot f_{a,f}(T_{\text{н.г.}}) \cdot F(\chi_{\text{гр}}), \text{ барн.} \quad (6.3)$$

При пересчете сечений по формуле (6.3), температура нейтронного газа равной 1322К, и для данной температуры нейтронного газа произведем расчет макроскопических и микроскопических сечений.

Таблица 7 – Результаты расчетов концентраций, макроскопических и микроскопических сечений

Нуклид	σ_a	σ_{tr}	Σ_a	Σ_f	Σ_{tr}	$\xi \Sigma_s$	Σ_s
U^{235}	217,23	232,23	0,1186	0,097	0,127	6,88E-05	0,0082
U^{238}	0,86	9,86	0,0152	–	0,174	1,33E-03	0,1588
Pu^{239}	326,96	336,46	1,4872	1,0305	1,53	3,59E-04	0,0432
C^{12}	0	4,42	0,0001	–	0,366	6,15E-02	0,3892
Na^{23}	0,17	3,17	0,0085	–	0,161	1,33E-02	0,1572
O	0	3,6	0	–	0,164	2,05E-02	0,1706
Cr^{52}	0,99	5,14	0,0153	–	0,08	2,51E-03	0,0653
Ni^{59}	1,46	18,29	0,0114	–	0,142	4,42E-03	0,1321
Fe^{56}	0,8	12,09	0,0491	–	0,738	2,46E-02	0,6957
Топливо	–	–	1,6210	1,1275	1,995	2,22E-02	0,3808
Теплоноситель	–	–	0,0085	–	0,161	1,33E-02	0,1572
Оболочка	–	–	0,0771	–	0,964	3,16E-02	0,8960

2.6.2 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды

Коэффициент размножения для бесконечной среды «горячего» реактора определим так же, как и для «холодного», только с учетом всех пересчитанных сечений.

Коэффициент выхода нейтронов на одно поглощение равен:

$$\eta = 2,87 \cdot \frac{1,275}{1,621} = 1,996.$$

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах остается таким же как и для холодного реактора и будет равен:

$$\mu = 1,004$$

Находим коэффициент использования тепловых нейтронов, но с учетом наших пересчитанных сечений.

Определим сечения, усредненные по фиктивному блоку:

$$\Sigma_a^\phi = 0,34 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^\phi = 1,15 \text{ см}^{-1}.$$

С помощью усреднённых сечений по фиктивному блоку найдём длину диффузии:

$$L_\phi = 1,63 \text{ см};$$

$$L_{зам} = 92,98 \text{ см}.$$

Подставляем найденные значения в формулы и находим коэффициент использования тепловых нейтронов:

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

$$(E-1) = 0,5 \cdot \left(\frac{14,1}{92,98} \right)^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{14,1}{1,63} \right) - 0,75 \right) = 0,016;$$

$$F = \frac{\bar{\Phi}_{зам}}{\bar{\Phi}_{\phi.б.}} = \frac{1}{2} \frac{R_{\phi.б.}}{L_{\phi.б.}} \frac{I_0 \left(\frac{R_{\phi.б.}}{L_\phi} \right)}{I_1 \left(\frac{R_{\phi.б.}}{L_{\phi.б.}} \right)};$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{3,4}{1,63} \cdot \frac{I_0 \left(\frac{3,4}{1,63} \right)}{I_1 \left(\frac{3,4}{1,63} \right)} = 1,46;$$

$$\frac{1}{\theta'_{\phi.б.}} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \Sigma_{a_{зам}}}{S_{\phi.б.} \cdot \Sigma_{a_{\phi.б.}}} + (E-1) ;$$

$$\frac{1}{\theta'_{\phi.б.}} = 1 + 1,44 \cdot \frac{588,68 \cdot 0,000105}{36,31 \cdot (0,0039 + 0,31 + 0,026)} + 0,016 = 1,023, \text{ тогда } \theta'_{\phi.б.} = 0,977;$$

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_a^{\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}}}{\Sigma_a^\phi \cdot S_\phi} = \frac{0,309}{0,309 + 0,004 + 0,026} = 0,91.$$

Коэффициент равен:

$$\theta = 0,977 \cdot 0,91 = 0,89.$$

Вероятность избежать резонансного захвата равна:

$$\varphi = \exp \left(- \frac{K_T \cdot R_U \cdot \sqrt{R \cdot n \cdot \mu_1} + 0,73 \cdot n \cdot R_U^2 \cdot \mu_1}{\xi \Sigma_{s \text{ гет C}} \cdot S_C + \xi \Sigma_{s \text{ ф}} \cdot S_\phi} \right);$$

$$\varphi = \exp \left(- \frac{1,44 \cdot 0,35 \cdot \sqrt{18 \cdot 3,4 \cdot 0,369} + 0,73 \cdot 18 \cdot 0,35^2 \cdot 0,368}{0,0615 \cdot 588,68 + 36,32 \cdot (0,006 + 0,004 + 0,012)} \right) = 0,933.$$

Коэффициент размножения для бесконечной среды:

$$k_\infty = 1,66.$$

2.6.3 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения для «горячего» реактора определяется по формуле:

$$k_{\text{эф}}^{\text{гор}} = \frac{k_\infty^{\text{гор}} e^{-B^2 \tau_p^{\text{гор}}}}{1 + B^2 L_p^2 \text{гор}}. \quad (6.4)$$

Рассчитаем длину диффузии для решетки «горячего» реактора, по аналогии расчета, в случае с «холодным реактором»:

$$L_p^2 = L_{\text{зам}}^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{\bar{\Phi}_\phi}{\bar{\Phi}_{\text{зам}}} \right) \cdot S_{\text{яч}}}{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{\bar{\Sigma}_{tr}^\phi}{\bar{\Sigma}_{tr}^{\text{зам}}} \right) \cdot S_{\text{зам}}} \cdot (1 - \theta_\phi), \quad (6.6)$$

$$L_p^{\text{гор}2} = 2758 \cdot \frac{\left(1 + \frac{1,44}{588,68} \cdot 36,32 \right) \cdot 625 \cdot (1 - 0,977)}{\left(1 + \frac{36,32}{588,68} \cdot \frac{(0,073 + 0,38 + 0,329)}{0,366} \right) \cdot 588,68} = 64,48 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов в «горячем» реакторе также необходимо пересчитывать. Для этого можно воспользоваться формулой

$$\tau_{гор} = \tau_{хол} - \frac{1}{3\xi \sum_s \Sigma_s} \ln \frac{T_{н.з.}}{T_0} = 352 \cdot \left(\frac{625}{588,68} \right) = 396,8 \text{ см}^2.$$

Значение геометрического параметра для «горячего» реактора рассчитывается по аналогии с расчетом для «холодного» и имеет значение $B^2 = 3,08 \cdot 10^{-5}$.

Окончательно, эффективный коэффициент размножения «горячего» реактора:

$$k_{эф}^{гор} = \frac{k_{\infty}^{гор} e^{-B^2 \tau_p}}{1 + B^2 L_p^2} = \frac{1,66 \cdot \exp(-3,08 \cdot 10^{-5} \cdot 396,8)}{1 + 3,08 \cdot 10^{-5} \cdot 64,48} = 1,64.$$

С учетом найденных значений эффективного коэффициента размножения для «холодного» и «горячего» реакторов, можно определить температурный коэффициент реактивности ТКР по следующей формуле:

$$\frac{\Delta k_{эф}}{\Delta T} = \frac{k_{эф}^{гор} - k_{эф}^{хол}}{T_{зам.} - 293} = \frac{1,64 - 1,65}{900 - 293} \approx 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (6.7)$$

2.7 Отравление

2.7.1 Определение равновесной концентрации Xe и I

Мощность можно определить по формуле:

$$N = \Sigma_f \cdot E_f \cdot \Phi \cdot V,$$

где E_f – энергия, высвобождающаяся при делении одного ядра, Дж;
 Φ – плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$;
 V – объём топлива, см^3 .

Определим среднюю плотность потока нейтронов по реактору:

$$\Phi = \frac{N}{\Sigma_f \cdot E_f \cdot V} = \frac{21 \cdot 10^8}{6,3 \cdot 10^8 \cdot 0,0125 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}} = 8,33 \cdot 10^{12} \text{ нейтрон/см}^2 \text{ с}.$$

Определим равновесные концентрации ксенона (N_{Xe}^{cm}) и йода (N_I^{cm}), полагая, что ядерный реактор после пуска был мгновенно выведен на номинальную мощность:

$$N_I^{cm} = \frac{\omega_I \cdot \Sigma_f^{TOP} \cdot \Phi}{\lambda_I} = \frac{0,056 \cdot 0,0125 \cdot 8,33 \cdot 10^{12}}{2,87 \cdot 10^{-5}} = 3,49 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3},$$

$$N_{Xe}^{cm} = \frac{(\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \Sigma_f^{TOP} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi} = \frac{(0,056 + 0,003) \cdot 0,0125 \cdot 8,33 \cdot 10^{12}}{2,09 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 8,66 \cdot 10^{12}} = 2,42 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

2.7.2 Динамика изменения концентраций Xe и I

До достижения равновесного состояния, концентрации ксенона и йода изменяются по законам:

$$N_I(t) = N_I^{cm} (1 - e^{-\lambda_I \cdot t}) = 3,49 \cdot 10^{15} \cdot (1 - e^{-2,87 \cdot 10^{-5} \cdot t});$$

$$N_{Xe}(t) = N_{Xe}^{cm} (1 - e^{-(\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}) \cdot t}) - \frac{N_I^{cm}}{\frac{\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}}{\lambda_I} - 1} \cdot (e^{-\lambda_I \cdot t} - e^{-(\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}) \cdot t}) =$$

$$= 2,41 \cdot 10^{15} \cdot (1 - e^{-(2,09 \cdot 10^{-5} + 8,33 \cdot 10^{12} \cdot 2,75 \cdot 10^{-18}) \cdot t}) - \frac{3,49 \cdot 10^{15}}{\frac{2,09 \cdot 10^{-5} + 8,33 \cdot 10^{12} \cdot 2,75 \cdot 10^{-18}}{2,87 \cdot 10^{-5}} - 1} \cdot$$

$$\cdot (e^{-2,87 \cdot 10^{-5} \cdot t} - e^{-(2,09 \cdot 10^{-5} + 8,33 \cdot 10^{12} \cdot 2,75 \cdot 10^{-18}) \cdot t}) =$$

$$= 2,41 \cdot 10^{15} \cdot (1 - e^{-(4,38 \cdot 10^{-5}) \cdot t}) - 6,63 \cdot 10^{15} \cdot (e^{-2,87 \cdot 10^{-5} \cdot t} - e^{-(4,38 \cdot 10^{-5}) \cdot t}).$$

Изменяя время, строим график. График изменения концентраций Xe и I представлен на рисунке 1.

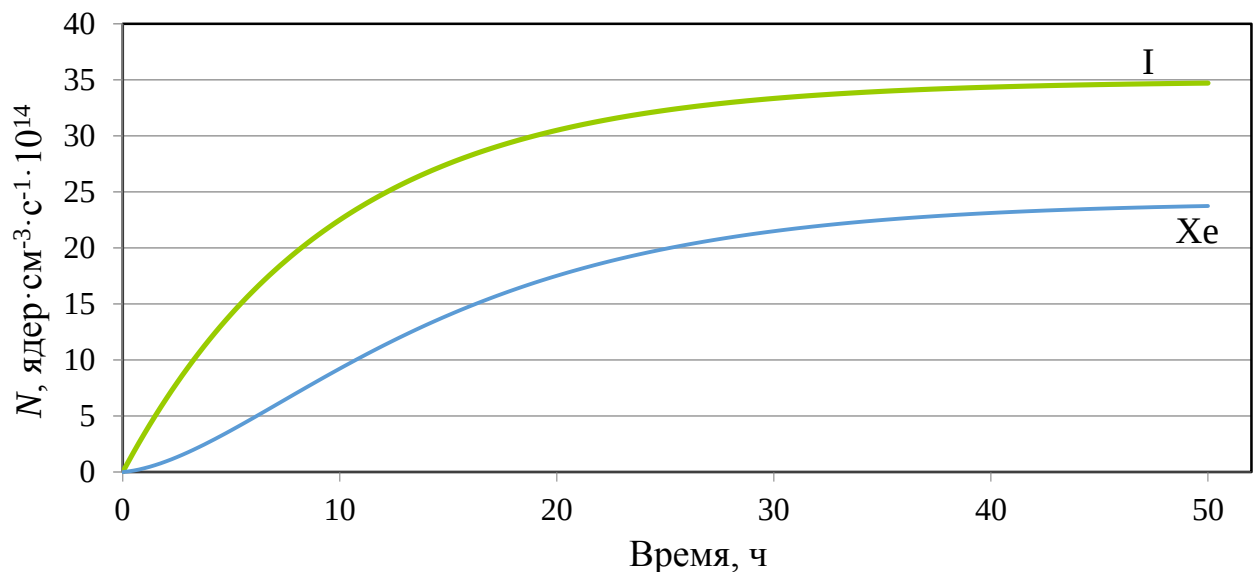


Рисунок 1 – График изменения концентраций Хе и I при пуске реактора

Концентрации ксенона и йода в работающем реакторе увеличиваются постепенно от нуля до равновесной и при $t \rightarrow \infty N_{Xe}(\infty) \rightarrow N_{Xe}^{cm}$. Второй член в формуле, замедляет процесс накопления ксенона, описываемый первым членом, так как в реакторе должна предварительно накопиться равновесная концентрация йода.

Время достижения ксеноном 90 % от равновесной концентрации равно:

$$t_{Xe}^{ct} = 37\text{ч.}$$

2.7.3 Потери реактивности при отравлении ксеноном

Потери реактивности при отравлении ксеноном с момента пуска реактора и до установления стационарного значения описывается законом:

$$\rho_{Xe,Sm} = -\theta \cdot \frac{N_{Xe,Sm} \cdot \sigma_a^{Xe,Sm}}{\Sigma_a^{top}},$$

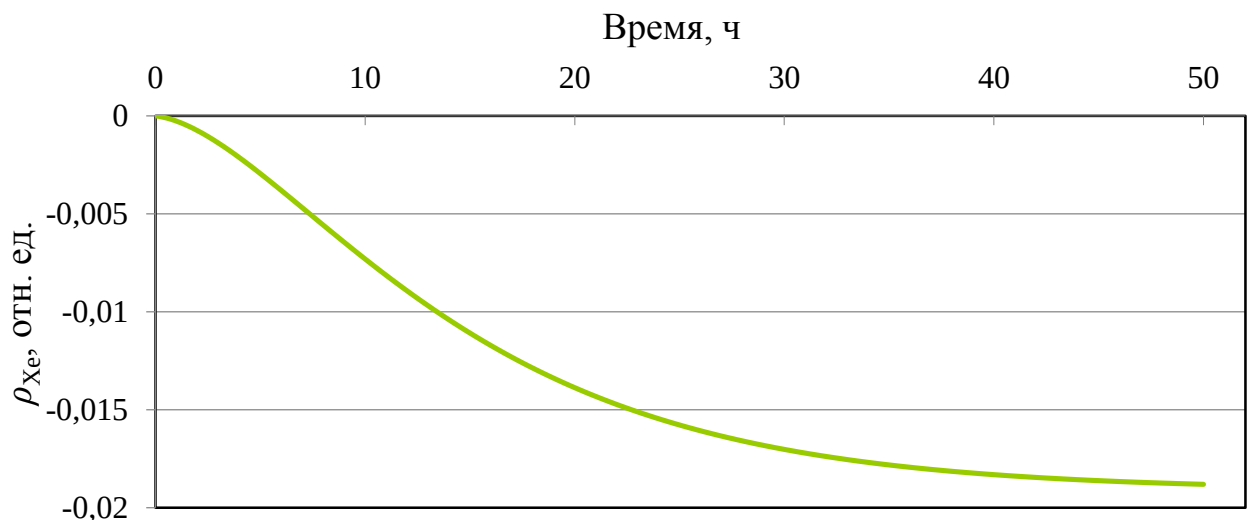


Рисунок 2 – Вклад в реактивность Хе.

2.7.4 «Йодная яма»

Потери реактивности после останова реактора определяются:

$$\rho_{Xe,Sm} = -\theta \cdot \frac{N_{Xe,Sm} \cdot \sigma_a^{Xe,Sm}}{\Sigma_a^{top}},$$

Время достижения полной глубины «йодной ямы» определим по рисунку 3. Оно составит 5ч.

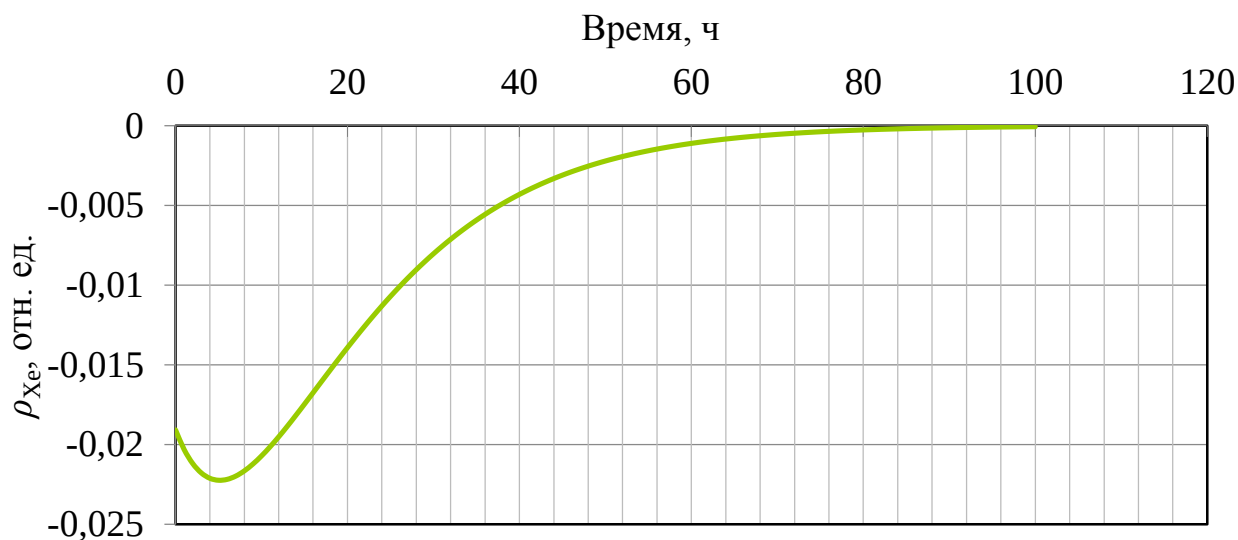


Рисунок 3 – Переотравление («йодная яма») ядерного реактора после остановки

График изменения концентраций ксенона после остановки показан на рисунке 4.

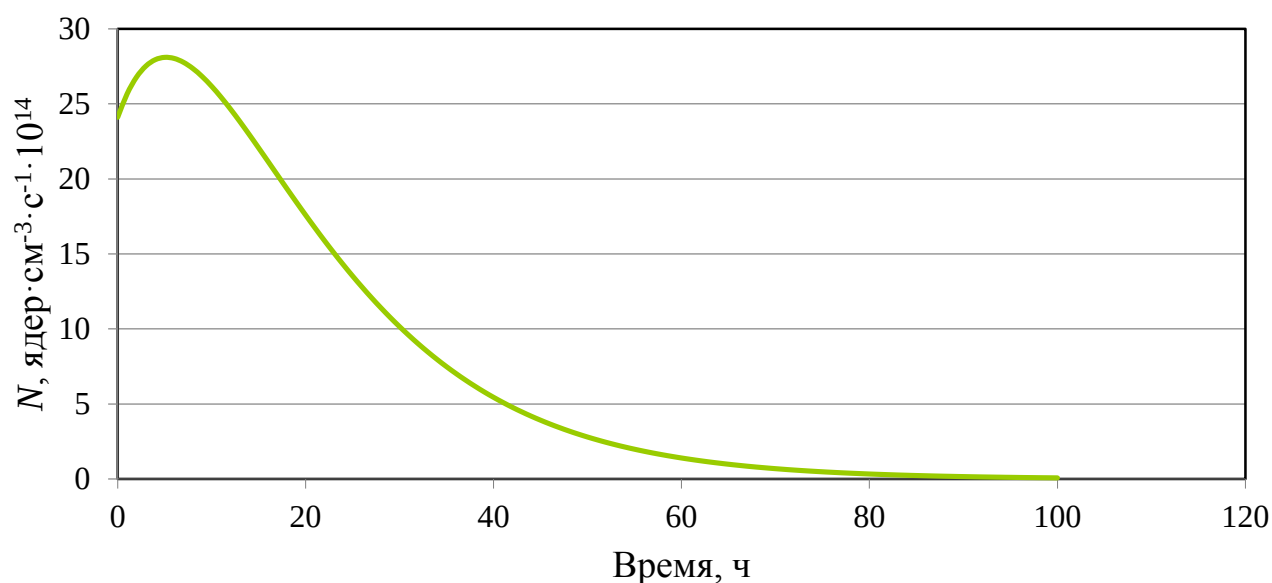


Рисунок 4 – Концентрация Xe после остановки реактора

После останова реактора наблюдается рост концентрации ксенона, обусловленный большей скоростью распада йода по сравнению со скоростью распада ксенона. После достижения максимума концентрация ксенона падает в пределах до нуля. Соответственно концентрации ксенона, потери реактивности сначала возрастают, начиная со стационарного значения, а после достижения максимального значения уменьшаются и стремятся в пределах к нулю, когда распадется весь ксенон.

2.7.5 Определение равновесной концентрации S_m и P_m

Определим равновесные концентрации ксенона (N_{Sm}^{cm}) и йода (N_{Pm}^{cm}), полагая, что ядерный реактор после пуска был мгновенно выведен на номинальную мощность:

$$N_{Pm}^{cm} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f^{TOP} \cdot \Phi}{\lambda_{Pm}} = \frac{0,013 \cdot 0,215 \cdot 8,33 \cdot 10^{12}}{4,1 \cdot 10^{-6}} = 5,69 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3},$$

$$N_{Sm}^{cm} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f^{TOP}}{\sigma_{Sm}} = \frac{0,013 \cdot 0,215}{5,92 \cdot 10^{-20}} = 4,72 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

2.7.6 Динамика изменения концентрации S_m

До достижения равновесного состояния, концентрация самария изменяется по закону:

$$N_{Pm}(t) = N_{Pm}^{cm} (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}) = 5,69 \cdot 10^{15} \cdot (1 - e^{-4,1 \cdot 10^{-6} \cdot t}),$$

Изменяя время, строим график изменения концентрации S_m . График представлен на рисунке 5.

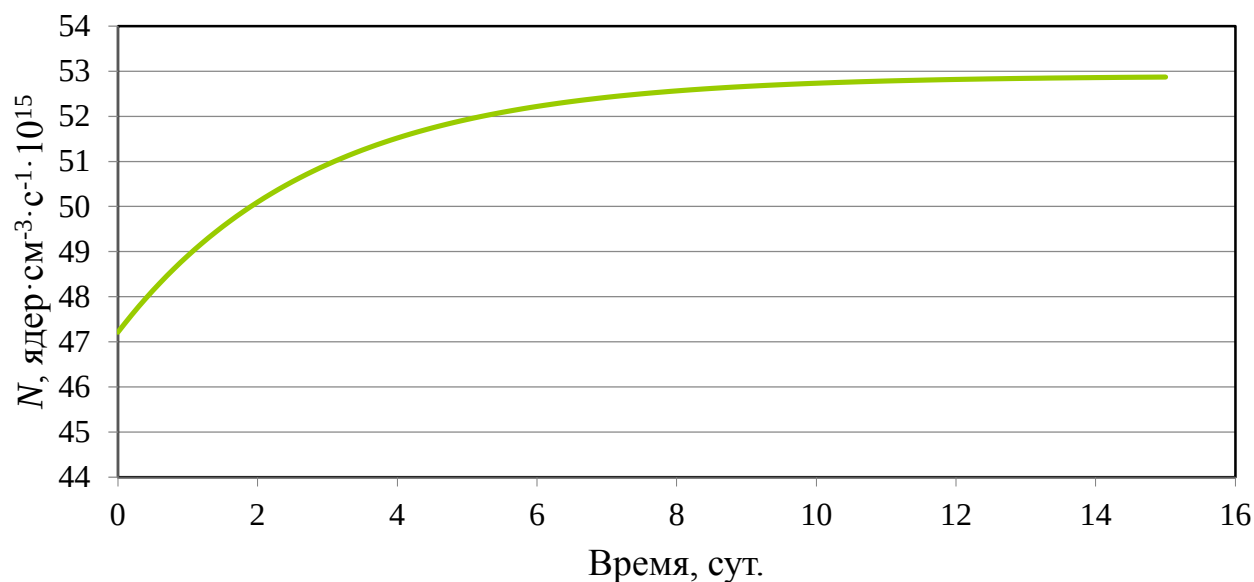


Рисунок 5 – График изменения концентрации Sm при пуске реактора

2.7.7 Потери реактивности при отравлении самарием

Потери реактивности при отравлении ксеноном с момента пуска реактора и до установления стационарного значения определяются:

$$\rho_{\text{Sm}} = -\theta \cdot \frac{N_{\text{Sm}} \cdot \sigma_a^{\text{Sm}}}{\Sigma_a^{\text{топ}}}.$$

Меняя время, строим график процесса изменения реактивности из-за отравления ядерного реактора самарием при выводе на мощность. График показан на рисунке 6.

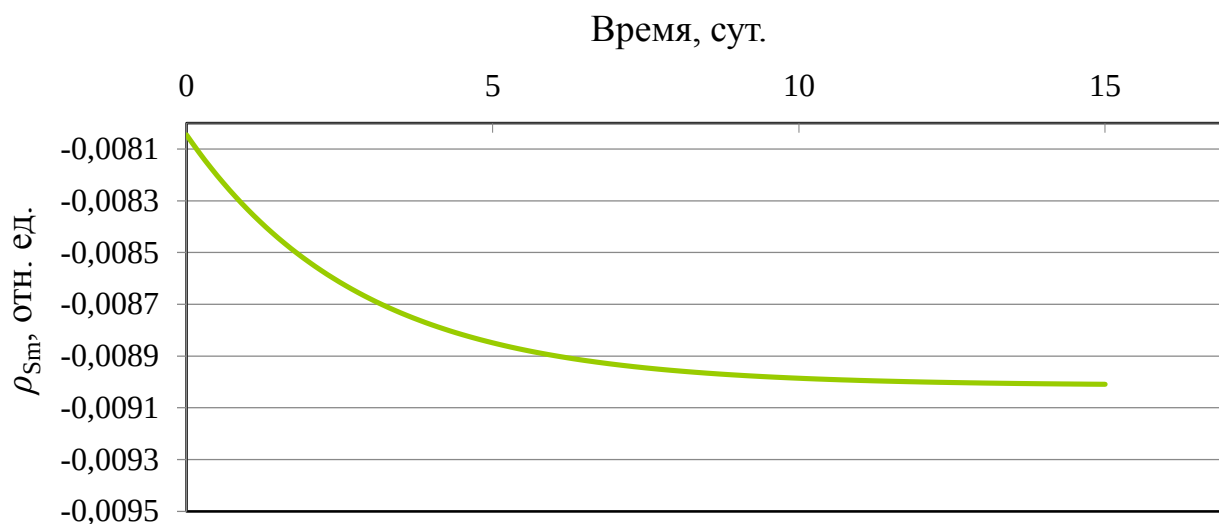


Рисунок 6 – Отравление Sm ядерного реактора при выходе на мощность

2.7.8 «Прометиевый провал»

Концентрация самария после остановки ядерного реактора определяется по формуле:

$$N_{Sm}(t) = N_{Sm}^{cm} + N_{Pm}^{cm} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}) = 4,72 \cdot 10^{16} + 5,69 \cdot 10^{15} \cdot (1 - e^{-4,1 \cdot 10^{-6} t}).$$

График изменения концентрации самария после остановки показан на рисунке 7.

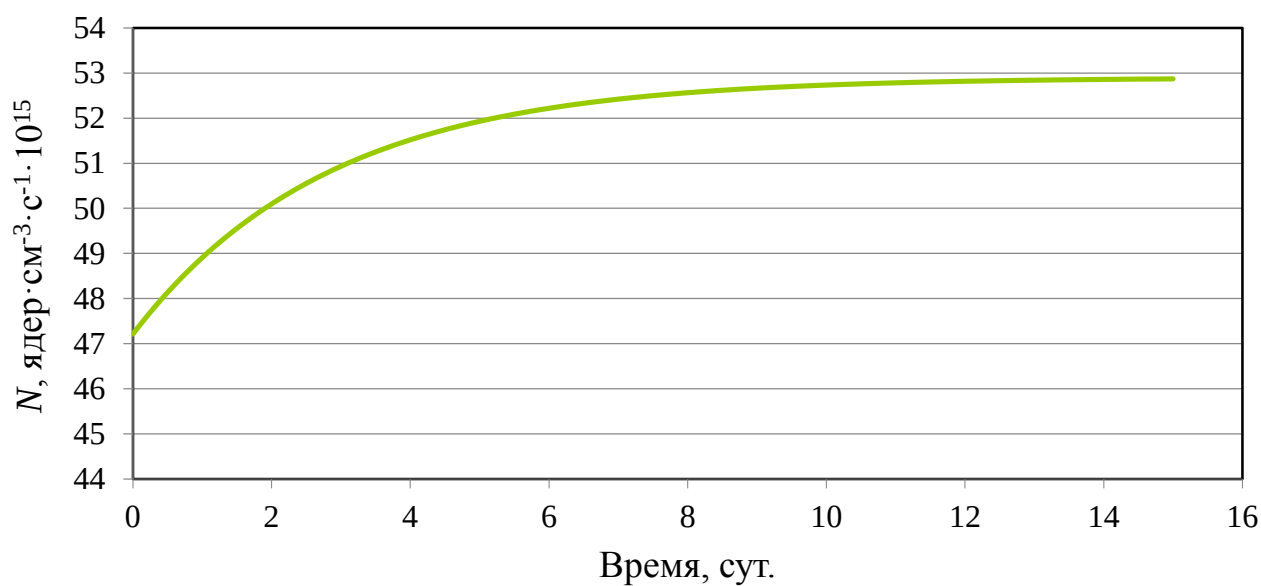


Рисунок 7 – Концентрация Sm после остановки реактора

2.8 Многогрупповой расчет

2.8.1 Методика многогруппового расчета

Многогрупповая система уравнений диффузии для критического ядерного реактора (стационарная задача) имеет вид:

$$D^{(i)} \Delta \Phi^{(i)} - \Sigma_a^{(i)} \Phi^{(i)} - \sum_{k=i+1}^{26} \Sigma_R^{i \rightarrow k} \Phi^{(i)} + \sum_{k=1}^{i-1} \Sigma_R^{k \rightarrow i} \Phi^{(k)} + \varepsilon^{(i)} \sum_{k=1}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi^{(k)} = 0, \quad (8.1)$$

где i – номер группы, для которой записано уравнение;

k – номер группы;

$D^{(i)}$ – коэффициент диффузии нейтронов i -ой группы;

$\Phi^{(i)}, \Phi^{(k)}$ – плотности потоков нейтронов в соответствующих группах;

$\Sigma_a^{(i)}$ – макроскопическое сечение поглощения нейтронов i -ой группы;

$\Sigma_R^{i \rightarrow k}, \Sigma_R^{k \rightarrow i}$ – макроскопическое сечение перехода нейтронов из i -ой в ниже лежащую k -ую (из выше лежащей k -ой в рассматриваемую i -ую) группу, соответственно;

$\varepsilon^{(i)}$ – вероятность для нейтрона деления попасть непосредственно в i -ую группу;

$\nu_f^{(k)}$ – среднее число нейтронов на акт деления; $\Sigma_f^{(k)}$ – макроскопическое сечение деления для нейтронов k -ой группы.

Согласно уравнению критического реактора, в диффузионно-возрастном приближении первое слагаемое в уравнении (6.7), описывающее утечку нейтронов из активной зоны, будет определяться по соотношению:

$$D^{(i)} \Delta \Phi^{(i)} = -D^{(i)} B^2 \Phi^{(i)} \quad (8.2)$$

где B^2 – геометрический параметр.

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

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

где j – номер итерации, начиная с первой.

С этой целью систему многогрупповых уравнений диффузии с учетом соотношения (7.1) необходимо привести к виду:

$$-D^{(i)}B^2\Phi^{(i)} - \Sigma_a^{(i)}\Phi^{(i)} - \sum_{k=i+1}^{26} \Sigma_R^{i \rightarrow k} \Phi^{(i)} + \sum_{k=1}^{i-1} \Sigma_R^{k \rightarrow i} \Phi^{(k)} + \varepsilon^{(i)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{26} v_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi^{(k)} + \varepsilon^{(i)} v_f^{(i)} \Sigma_f^{(i)} \Phi^{(i)} = 0. \quad (8.3)$$

Выражая значение плотности потока в i -ой группе из (35) получим:

$$\Phi_j^{(i)} = \frac{\varepsilon^{(i)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{26} v_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi_{j-1}^{(k)} + \sum_{k=1}^{i-1} \Sigma_R^{k \rightarrow i} \Phi_j^{(k)}}{D^{(i)}B^2 + \Sigma_a^{(i)} + \sum_{k=i+1}^{26} \Sigma_R^{i \rightarrow k} - \varepsilon^{(i)} v_f^{(i)} \Sigma_f^{(i)}}. \quad (8.4)$$

Система уравнений преобразуется к виду:

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

В представленной системе уравнений известны все параметры за исключением плотностей потоков на предыдущей итерации $\Phi_{j-1}^{(k)}$, а, следовательно, и $\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi_{j-1}^{(k)}$. Данная сумма определяет число нейтронов, образующихся во втором поколении при делении ядер всеми нейтронами первого поколения, кроме нейтронов i -ой группы.

Для начала итерационного процесса на нулевой итерации плотность потока нейтронов в i -ой группе определялась из соотношения (8.1) с учетом (8.2) по следующему соотношению:

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

где число нейтронов, образующихся во втором поколении при делении ядер всеми нейтронами первого поколения, задавалось равным единице ($\sum_{k=1}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi_0^{(k)} = 1$).

Спектр нейтронов в ядерном реакторе представляет собой спектр нейтронного деления, смягченный эффектами неупругого и упругого замедления на тяжелых ядрах.

Эффективным методом расчета спектра нейтронов является многогрупповой метод, основная идея которого состоит в том, что вся область энергий нейтронов делится на конечное число интервалов – групп.

В пределах каждой группы сечения ядерных процессов считаются не зависящими от энергии нейтронов.

Предполагается, что для каждой группы могут быть рассмотрено односкоростное кинетическое уравнение в диффузионно-возрастном приближении и сопряженное ему уравнение ценностей нейтронов, описывающее баланс нейтронов и ценностей в объеме реактора. Приведенный

многогрупповой расчет спектра нейтронов позволяет в дальнейшем получить эффективные двухгрупповые константы.

В дальнейшем будет принята следующая система обозначений:

m – общее число энергетических групп;

k, i, j – текущий индекс группы;

ε_j – доля нейтронов группы « j » в спектре деления $\int \varepsilon(U) dU = 1$;

D – коэффициент диффузии нейтронов, см;

Σ_a, Σ_f – макроскопические сечения поглощения и деления, см^{-1} , причем

для делящегося изотопа $\Sigma_a = \Sigma_f + \Sigma_c$;

Σ_{tr}^k – транспортное сечение группы « k », см^{-1} ;

Σ_3^k – полное сечение замедления группы « k » во все нижележащие группы см^{-1} ;

Σ_3^{ik} – сечение замедления группы « i » в группу « k » см^{-1} ;

ν_f^j – выход нейтронов на одно деление в группе « j ».

2.8.2 Гетерогенные эффекты, поправка на самоэкранирование

Для повышения точности расчета необходим учет гетерогенных эффектов. Микроскопическое сечение отдельного элемента внутри группы зависит не только от энергии нейтрона, но и от количества других элементов, а также от величины их микроскопических сечений.

Количественно эта зависимость характеризуется коэффициентом f , который зависит от величины $\sigma_{0,l}^i$ и температуры материала.

$\sigma_{0,l}^i$ рассчитывается как:

$$\sigma_{0,l}^i = \frac{1}{N_l} \cdot \sum_{m \neq l} \sigma_{t,m}^i \cdot N_m \quad (8.5)$$

где l – элемент для которого рассчитывается поправка;

i – номер энергетической группы нейтронов;

m – остальные элементы активной зоны;

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

N_l, N_m – концентрации элементов l и m соответственно.

Температуры материалов ЯР в горячем состоянии:

– $T_{KM} = 900$ ° K;

– $T_{3AM} = 900$ ° K;

– $T_{ЯТ} = 2100$ ° K.

Рассчитанные по соотношению (8.1) значения $\sigma_{0,l}^i$ и соответствующие ему значения f при рабочих температурах отражены в Приложении В таблица В.1.

Пересчет микроскопических сечений деления и поглощения для 1 – 25 группы осуществляется по формулам:

$$\sigma_c = \sigma_{c_0} \cdot f_c, \quad (8.6)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f_0} \cdot f_f, \quad (8.7)$$

где $\sigma_{c_0}, \sigma_{f_0}$ – табличные значения сечений;

f – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение сечения в результате эффекта самоэкранировки.

Табличные значения микроскопических сечений поглощения и деления приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Табличные значения σ_a, σ_f элементов входящих в состав АкЗ

№ Гру ппы	σ_f^{U235} , барн	σ_a^{U235} , барн	σ_c^{U238} , барн	σ_f^{Pu239} , барн	σ_a^{Pu239} , барн	σ_c^{C12} , барн	σ_c^{Na23} , барн	σ_c^{Cr52} , барн	σ_c^{Ni59} , барн	σ_c^{Fe56} , барн
1	1,75	1,77	0	2,2	2,21	0,002	0,05	0,035	0,23	0,036
2	1,15	1,18	0,01	1,85	1,87	0	0,005	0,003	0,19	0,005
3	1,25	1,29	0,02	1,97	2	0	0,0002	0,003	0,135	0,002
4	1,28	1,34	0,06	1,95	1,99	0	0,0002	0,003	0,072	0,003
5	1,25	1,37	0,13	1,8	1,86	0	0,0002	0,004	0,03	0,004
6	1,23	1,4	0,13	1,68	1,79	0	0,0003	0,004	0,011	0,005
7	1,41	1,66	0,15	1,66	1,83	0	0,0006	0,005	0,009	0,006
8	1,7	2,1	0,22	1,68	1,92	0	0,0012	0,006	0,01	0,006
9	2,1	2,7	0,35	1,85	2,25	0	0,0015	0,008	0,016	0,007
10	2,65	3,65	0,46	2,15	2,86	0	0,0022	0,01	0,016	0,0169
11	3,4	4,9	0,6	2,4	3,48	0	0,001	0,013	0,033	0,005
12	4,4	6,5	0,7713	2,5	3,75	0	0,001	0,02	0,018	0,004
13	5,4	8,15	1,1952	3,4	5,3	0	0,0561	0,0298	0,048	0,011
14	7,3	11,1	1,8581	4,2	6,8	0	0,01	0,0486	0,019	0,106
15	11	17,3	2,659	7,6	12,6	0	0,005	0,0761	0,028	0,015
16	16	25,5	2,745	13	22,1	0	0,006	0,03	0,041	0,028
17	22	35,5	4,8382	19	33	0	0,007	0,041	0,061	0,037
18	34,65	56,21	3,498	61	107	0	0,01	0,06	0,089	0,053
19	42,75	71,89	9,367	22	53	0	0,015	0,087	0,131	0,072
20	40,95	89,55	16,711	110	182	0	0,022	0,129	0,193	0,105
21	32,56	69,96	39,979	45	80	0	0,032	0,189	0,283	0,154
22	20	26,79	0,54	12	13	0	0,046	0,28	0,414	0,22
23	35	48	0,47	24	27	0	0,068	0,41	0,608	0,33
24	64	74	0,58	103	176	0,001	0,101	0,6	0,894	0,49
25	155	190	0,9	1670	2880	0,001	0,147	0,87	1,314	0,72
26	582	683	2,71	742	2,21	0,004	0,525	3,1	4,6	2,53

Пересчет микроскопических сечений поглощения и деления тепловой группы осуществляется по соотношениям:

$$\sigma_a(T_{н.г.}) = \sigma_{a_0} \cdot 0,886 \cdot g_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}; \quad (8.8)$$

$$\sigma_f(T_{н.г.}) = \sigma_{f_0} \cdot 0,886 \cdot g_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \quad (8.9)$$

где g – g -фактор, зависящий от температуры нейтронного газа.

Для подбора g -фактора используется полученная ранее $T_{н.г.} = 477^\circ K$.

Расчет проводился по аналогии с разделами 3 и 6.

Значения g -факторов представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Значения g-фактора для некоторых изотопов при $T_{н.з.} = 477^\circ K$.

	U^{235}	U^{238}	O^{16}	C^{12}	Na^{23}	K^{39}	Cr^{52}	Ni^{59}	Fe^{56}	Pu^9	Pu^{40}	Pu^{41}	Pu^{42}
ga	0,9457	1,0049	1	1	1	1	1	1	1	1,3388	1,3495	1,7215	1,067
gf	0,9411	1	1	1	1	1	1	1	1	1,2528	1	1	1

Значения микроскопических сечений деления и поглощения с учетом поправок сведены в таблицу 10.

Таблица 10 – Значения σ_a, σ_f , элементов АкЗ с учетом самоэкранировки

№ Гру ппы	$\sigma_f^{U^{235}}$, барн	$\sigma_a^{U^{235}}$, барн	$\sigma_c^{U^{238}}$ барн	$\sigma_c^{U^{238}-Pu^{239}}$ барн	$\sigma_a^{Pu^{239}}$, барн	$\sigma_c^{C^{12}}$, барн	$\sigma_c^{Na^{23}}$, барн	$\sigma_c^{Cr^{52}}$, барн	$\sigma_c^{Ni^{59}}$, барн	$\sigma_c^{Fe^{56}}$, барн
1	1,75	1,77	0	2,2	2,21	0,002	0,05	0,035	0,23	0,036
2	1,15	1,18	0,01	1,85	1,87	0	0,005	0,003	0,19	0,005
3	1,25	1,29	0,02	1,97	2	0	0,0002	0,003	0,135	0,0019
4	1,28	1,34	0,06	1,95	1,99	0	0,0002	0,003	0,072	0,0029
5	1,25	1,37	0,13	1,8	1,86	0	0,0002	0,004	0,03	0,0039
6	1,23	1,4	0,13	1,68	1,79	0	0,0003	0,004	0,011	0,0049
7	1,41	1,66	0,15	1,66	1,83	0	0,0006	0,005	0,009	0,0058
8	1,7	2,1	0,22	1,68	1,92	0	0,0011	0,0059	0,01	0,0058
9	2,1	2,7	0,35	1,85	2,25	0	0,0015	0,0079	0,016	0,0063
10	2,65	3,65	0,46	2,15	2,86	0	0,0022	0,0099	0,016	0,0112
11	3,4	4,9	0,6	2,4	3,48	0	0,001	0,0128	0,033	0,0049
12	4,4	6,5	0,7756	2,5	3,75	0	0,001	0,0198	0,018	0,0038
13	5,4	8,15	1,2	3,4	5,3	0	0,0591	0,0288	0,048	0,0107
14	7,3	11,1	1,9414	4,2	6,8	0	0,01	0,0454	0,019	0,0826
15	11	17,3	2,9851	7,6	12,6	0	0,005	0,0721	0,028	0,015
16	16	25,5	3,2184	13	22,1	0	0,006	0,03	0,041	0,028
17	22	35,5	6,103	19	33	0	0,007	0,041	0,061	0,037
18	35	57	4,4775	61	107	0	0,01	0,06	0,089	0,053
19	45	76	12,597	22	53	0	0,015	0,087	0,131	0,072
20	45	99	22,73	110	182	0	0,022	0,129	0,193	0,105
21	37	81	53,386	45	80	0	0,032	0,189	0,283	0,154
22	20	27	0,54	12	13	0	0,046	0,28	0,414	0,22
23	35	48	0,47	24	27	0	0,068	0,41	0,608	0,33
24	64	74	0,58	103	176	0,001	0,101	0,6	0,894	0,49
25	155	190	0,9	1670	2880	0,001	0,147	0,87	1,314	0,72
26	345,14	405,04	2,71	440,03	609,63	0,004	0,525	3,1	4,6	2,53

2.8.3 Расчет групповых констант

Рассмотрим расчет величин необходимых для решения системы многогрупповых уравнений диффузии, на примере 1-ой и 2-ой группы нейтронов.

Все константы необходимые для расчета параметров связанные с делением приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Групповые константы характеризующие процесс деления

i	$\sigma_f^{U^{235}}$	$\nu_f^{U^{235}}$	$\sigma_f^{U^{238}}$	$\nu_f^{U^{238}}$	$\sigma_f^{Pu^{239}}$	$\nu_f^{Pu^{239}}$
1	1,75	3,4	1	3,48	2,2	3,86
2	1,15	3,04	0,58	3,09	1,85	3,51

где i – номер группы;

σ_f – микроскопическое сечение деления;

ν_f – среднее число вторичных нейтронов на 1 акт деление.

В таблицу 12 сведены константы необходимые для расчета параметров рассеяния и поглощения.

Матрицы переходов при рассеянии на ядрах U^{235} , U^{238} , C^{12} , Na^{23} , Cr^{52} , Ni^{59} , Fe^{56} представлены в таблице 13.

Таблица 12 – Групповые константы характеризующие поглощение и рассеяние

Элемент	№ Группы	σ_c	σ_{in}	σ_e	μ_e
U^{235}	1	0,020	1,030	3,500	0,840
	2	0,030	1,920	4,300	0,800
U^{238}	1	0,000	1,800	3,500	0,840
	2	0,010	2,510	4,400	0,800
Pu^{239}	1	0,02	1,03	3,5	0,84
	2	0,03	1,92	4,3	0,8
C^{12}	1	0,002	0,350	0,850	0,350
	2	0,000	0,080	1,370	0,180
Na^{23}	1	0,050	0,650	1,500	0,600
	2	0,005	0,650	1,640	0,500
Cr^{52}	1	0,035	1,300	1,970	0,800
	2	0,003	1,250	2,350	0,670
Ni^{59}	1	0,230	1,270	2,000	0,800
	2	0,190	1,300	2,110	0,7300
Fe^{56}	1	0,036	1,370	1,990	0,830
	2	0,005	1,350	2,450	0,720

Таблица 13 – Матрица переходов на ядра некоторых элементов для 1-ой и 2-ой группы нейтронов

i	k	
	1	2
	σ_R^{U235} , барн	
	1	0,000
	2	0,033
	σ_R^{U238} , барн	
	1	0,000
	2	0,033
	σ_R^{Pu239} , барн	
	1	0,000
	2	0,026
	σ_R^{C12} , барн	
	1	0,000
	2	0,315
	σ_R^{Na} , барн	
	1	0,010
	2	0,294
	1	0,000
	2	0,09

где σ_c – микроскопическое сечение радиационного захвата;

σ_{in} – микроскопическое сечение неупругого рассеяния;

σ_e – микроскопическое сечение упругого рассеяния;

μ_e – средний косинус угла рассеяния при упругом рассеянии;

σ_R – микроскопическое сечение увода нейтрона в результате рассеяния из i-ой группы в группу k.

Расчет микроскопических сечений поглощения:

$$\sigma_a^1 = \sigma_f^1 + \sigma_c^1 = \begin{cases} U^{235} : 1,75 + 0,02 = 1,77 \text{барн}; \\ U^{238} : 1 + 0 = 1 \text{барн}; \\ C^{12} : 0 + 0,002 = 0,002 \text{барн}; \\ Na^{23} : 0 + 0,05 = 0,05 \text{барн}; \\ Pu^{239} = 2,2 + 0,02 = 2,22 \text{барн}; \\ Fe^{56} = 0 + 0,036 = 0,036 \text{барн}; \\ Cr^{52} = 0 + 0,035 = 0,035 \text{барн}; \\ Ni^{59} = 0 + 0,23 = 0,23 \text{барн}. \end{cases}$$

$$\sigma_a^2 = \sigma_f^2 + \sigma_c^2 = \begin{cases} U^{235} : 1,5 + 0,03 = 1,18 \text{барн}; \\ U^{238} : 0,58 + 0,01 = 0,59 \text{барн}; \\ C^{12} : 0 + 0 = 0 \text{барн}; \\ Na^{23} : 0 + 0,005 = 0,005 \text{барн}; \\ Pu^{239} = 1,85 + 0,03 = 1,88 \text{барн}; \\ Fe^{56} = 0 + 0,005 = 0,005 \text{барн}; \\ Cr^{52} = 0 + 0,003 = 0,003 \text{барн}; \\ Ni^{59} = 0 + 0,19 = 0,19 \text{барн}. \end{cases}$$

Так же рассчитали транспортные микроскопические сечения.

Расчёт макроскопических сечений проводится по формуле:

$$\Sigma_i = N \cdot \sigma_i \quad (8.10)$$

где Σ_i – макроскопическое сечение ядерной реакции;

N – гомогенная ядерная концентрация элемента;

σ_i – микроскопическое сечение ядерной реакции.

Расчёт суммарных макроскопических сечения деления для нейтронов 1-ой и 2-ой группы:

$$U^{235} : \begin{cases} \Sigma_f^1 = 6,05 \cdot 10^{-6} \cdot 1,75 = 1,06 \cdot 10^{-5} \text{см}^{-1}; \\ \Sigma_f^2 = 6,05 \cdot 10^{-6} \cdot 1,15 = 6,96 \cdot 10^{-5} \text{см}^{-1}. \end{cases}$$

$$U^{238} : \begin{cases} \Sigma_f^1 = 2,46 \cdot 10^{-4} \cdot 1 = 6,09 \cdot 10^{-5} \text{см}^{-1}; \\ \Sigma_f^2 = 2,46 \cdot 10^{-4} \cdot 0,58 = 3,53 \cdot 10^{-5} \text{см}^{-1}. \end{cases}$$

$$\text{Pu}^{239} : \begin{cases} \Sigma_f^1 = 5,04 \cdot 10^{-5} \cdot 2,2 = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}; \\ \Sigma_f^2 = 5,04 \cdot 10^{-5} \cdot 1,85 = 9,33 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}. \end{cases}$$

$$\Sigma_f^1 = 1,06 \cdot 10^{-5} + 6,09 \cdot 10^{-5} + 1,1 \cdot 10^{-4} = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^2 = 6,96 \cdot 10^{-5} + 3,53 \cdot 10^{-5} + 9,33 \cdot 10^{-5} = 1,98 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

Суммарные макроскопические сечения поглощения, транспортные и перехода нейтронов рассчитывались по аналогии:

$$\Sigma_a^1 = 0,00077 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^2 = 0,00032 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^1 = 0,071 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^2 = 0,093 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{in}^{1 \rightarrow 2} = 0,0288 \text{ см}^{-1}.$$

Коэффициент диффузии для нейтронов 1-ой группы:

$$D^1 = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^1} = \frac{1}{3 \cdot 0,071} = 4,66 \text{ см}.$$

Коэффициент диффузии для нейтронов 2-ой группы:

$$D^2 = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^2} = \frac{1}{3 \cdot 0,093} = 3,59 \text{ см}.$$

Так же учитывая экстраполированные размеры ядерного реактора можно рассчитать геометрические параметры для нейтронов 1-ой и 2-ой группы:

$$B_1^2 = \left(\frac{3,14}{H_{a3} + 2 \cdot \frac{0,7104}{\Sigma_{tr}^1}} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{\frac{D_{a3}}{2} + \frac{0,7104}{\Sigma_{tr}^1}} \right)^2 = 3,78 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}$$

$$B_2^2 = \left(\frac{3,14}{H_{a3} + 2 \cdot \frac{0,7104}{\Sigma_{tr}^2}} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{\frac{D_{a3}}{2} + \frac{0,7104}{\Sigma_{tr}^2}} \right)^2 = 3,82 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}$$

Полный перечень групповых константы для 26-ти групп нейтронов представлен в Приложении Б таблица Б.1. Константы указаны с учетом самоэкранировки.

Матрица переходов представлена в Приложении В таблица В.1.

2.8.4 Сходимость итерационного процесса

Для определения сходимости итерационного процесса для расчёта реактора было решено произвести расчёт ядерного реактора при комнатной температуре с помощью методики, представленной в первой главе [5].

После расчёта концентраций было решено использовать следующее допущение: гомогенизация активной площади по всему объёму активной зоны:

$$N_i = N_j \cdot \beta_j, \quad (8.11)$$

где N_j – концентрация элемента, без учета его доли в ячейке;

$$\beta_j = \frac{V_j}{V_{\text{яч}}} \text{ – доля } j\text{-го элемента в ячейке.}$$

Приведем доли элементов:

- $\beta_{\text{зам}} = 0,985$ – доля замедлителя;
- $\beta_{\text{т/н}} = 0,0054$ – доля теплоносителя;
- $\beta_{\text{топл}} = 0,0036$ – доля топлива;
- $\beta_{\text{км}} = 0,0053$ – доля конструкционных материалов.

Также был произведён пересчёт сечений с поправками на резонансную самоэкранировку:

$$\sigma_0 = \frac{\sum_{i=1}^{m \neq 1} \sigma_{t_m} \cdot N_{m_i}}{N_c}, \text{ барн,} \quad (8.12)$$

где σ_{t_m}, N_{m_i} – сечения и ядерная концентрация « m » элемента.

В зависимости от найденных σ_0 и температуры нейтронного газа выбираются поправки к сечениям f_i . С учетом поправок рассчитываются среднегрупповые значения сечений для данных элементов:

$$\overline{\sigma}_i = \sigma_i \cdot f(\sigma_0, T).$$

Как было отмечено ранее для начала итерационного процесса на нулевой итерации плотность потока нейтронов в i -ой группе определяется по соотношению:

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

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

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

В результате проведения 26-ти группового расчета ядерного реактора, был получен спектр плотности потока нейтронов в относительных единицах, который представлен на рисунке 13.

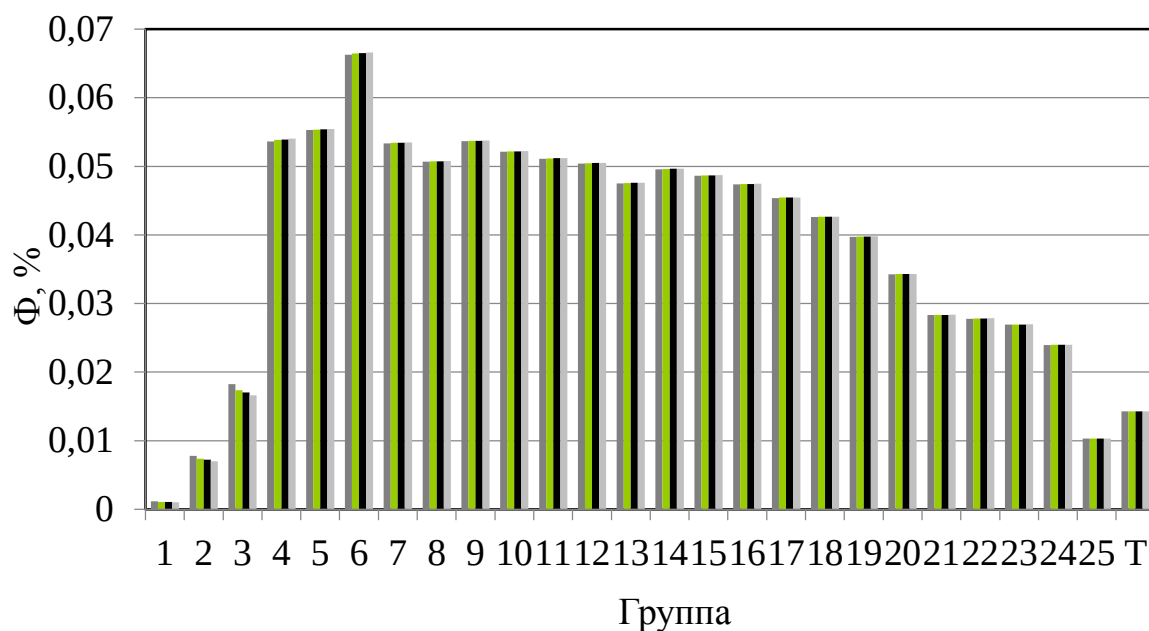


Рисунок 13 – График сходимости итерационного процесса

Из данного графика видно, что итерационный процесс виден в первой итерации, что может говорить о правильности проведенного расчёта.

2.8.5 Методика нормирования плотности потока и определения коэффициента размножения в конечной среде

Далее была проведена нормировка значения плотности потока нейтронов, исходя из тепловой мощности ядерного реактора (Q), по соотношению:

$$\Phi = \frac{Q}{q_f \cdot \overline{\Sigma}_f \cdot V_{a.z.}}, \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1} \quad (8.13)$$

где q_f – энергия, выделяющаяся при делении одного ядра, около 200 МэВ;

$V_{a.z.}$ – объём активной зоны;

$\overline{\Sigma}_f$ – среднее значение макроскопического сечения деления ядер по активной зоне;

$V_{a.z.}$ – объём активной зоны.

Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде, согласно методики многогруппового расчёта можно представить, как:

$$k_{эфф} = \frac{\overline{\nu \cdot \Sigma_f}}{D \cdot B^2 + \overline{\Sigma}_a}, \quad (8.14)$$

где $\overline{\nu \cdot \Sigma_f}, \overline{D \cdot B^2}, \overline{\Sigma}_a$ – есть величины усредненные по спектру нейтронов.

$$\overline{\nu \cdot \Sigma_f} = \sum_{i=1}^{26} \nu_i \cdot \Sigma_{fi} \cdot \delta_i;$$

$$\overline{\Sigma}_a = \sum_{i=1}^{26} \Sigma_{ai} \cdot \delta_i;$$

$$\overline{D \cdot B^2} = \sum_{i=1}^{26} D_i \cdot B_i^2 \cdot \delta_i;$$

где δ_i отношение потока i -той группы к общему потоку.

Полученные значения эффективного коэффициента размножения и запаса реактивности представлены в таблице 14:

Таблица 14 – Значения $k_{эфф}$ и $\rho_{зан}$ для ЯР в холодном и горячем состоянии

	$k_{эфф}$	$\rho_{зан}, \%$
Холодное состояние	1,262	20,8
Горячее состояние	1,146	12,7

Тогда температурный эффект реактивности определяется как:

$$\rho_T = 12,7 - 20,8 = -8,1 \%$$

2.8.6 Компенсация запаса реактивности

Для компенсации запаса реактивности и последующего расчета длительности кампании ядерного топлива, было решено использовать карбид бора, предполагая, что вся запасенная реактивность компенсируется только стержнями управления и защиты. Для реализации поставленной задачи было решено добавить к расчету изотопы С, 80% В¹¹ и 20% В¹⁰ с и природным изотопным составом бора. Следующим шагом необходимо изменять концентрацию таким образом, чтобы $k_{эфф}$ был максимально близок к 1.

В результате расчетов было получено следующее значение концентрации В₄С:

$$N_{B_4C} = 6,35 \cdot 10^{18} \frac{\text{молекул}}{\text{см}^3}$$

Получено следующее значение суммарной плотности потока нейтронов :

$$\Phi = \frac{2,1 \cdot 10^9}{(2,1 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot 6,3 \cdot 10^8 \cdot 1,48 \cdot 10^{-3})} = 7,03 \cdot 10^{13} \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2\text{с}}$$

Изменение спектра плотности потока нейтронов ЯР после добавления В₄С в материальный состав активной зоны представлено на рисунке 14.

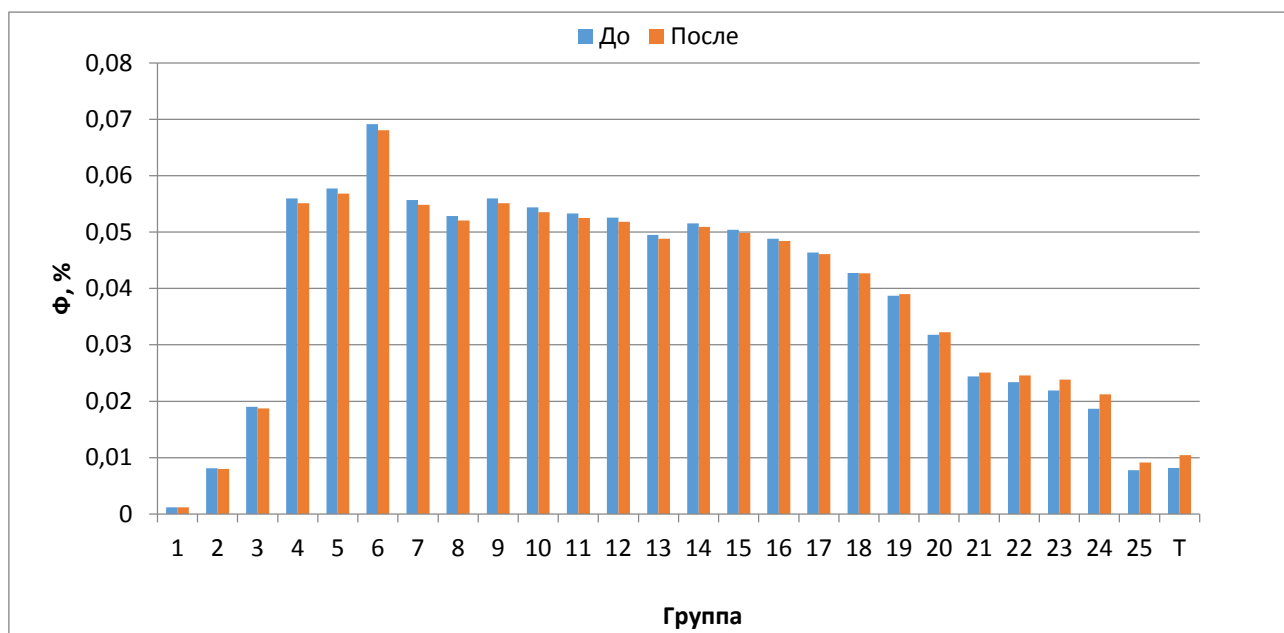


Рисунок 14 – Изменение спектра плотности потока нейтронов при добавление В₄С

Очевидно, что введение мощного поглотителя обуславливает рост макроскопического сечения поглощения нейтронов, что приводит к снижению их числа.

2.8.7 Определение нуклидного состава и длительности кампании

В рамках расчёта длительность кампании определялась с учетом изменения нуклидного состава, которое определялось с помощью конечно-разностной схемы:

$$\Delta N_5 = -\bar{\sigma}_a^5 \cdot N_5 \cdot \bar{\Phi} \cdot \Delta t$$

где Δt – единичный временной интервал;

$\bar{\sigma}_a^5$ – усредненные по спектру сечения

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

N_5 – стартовая концентрация;

В работе за единичный временной интервал принимался $\Delta t = 50$ эффективных суток. Таким образом, зная, начальные концентрация и

единичный временной интервал, был проведен расчет изменения нуклидного состава ядерного топлива за первые 50 суток работы реактора на мощности. Данная конечно-разностная схема представляет из себя решение для изотопа U^{235} , представленное из системы уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_5}{dt} = -\bar{\sigma}_a^5 \cdot N_5 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_8}{dt} = -\bar{\sigma}_a^8 \cdot N_8 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_9}{dt} = -\bar{\sigma}_a^9 \cdot N_9 \cdot \bar{\Phi} + \bar{\sigma}_c^8 \cdot N_8 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_0}{dt} = -\bar{\sigma}_a^0 \cdot N_0 \cdot \bar{\Phi} + \bar{\sigma}_c^9 \cdot N_9 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_1}{dt} = -\bar{\sigma}_a^1 \cdot N_1 \cdot \bar{\Phi} + \bar{\sigma}_c^0 \cdot N_0 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_2}{dt} = -\bar{\sigma}_a^2 \cdot N_2 \cdot \bar{\Phi} + \bar{\sigma}_c^1 \cdot N_1 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_{ПД_5}}{dt} = 2 \cdot \bar{\sigma}_f^5 \cdot N_5 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_{ПД_9}}{dt} = 2 \cdot \bar{\sigma}_f^9 \cdot N_9 \cdot \bar{\Phi} \end{array} \right.$$

Для определения длительности кампании реактора было решено посчитать изотопный состав для первых 50 суток, после чего конечный изотопный состав принимался за начальный и рассчитывался следующий период в 50 суток. Данный процесс продолжался до тех пор, пока запас реактивности ядерного реактора не опустится ниже 0. Длительность же кампании ядерного реактора определялась по формуле:

$$T_{яТ} = n \cdot \Delta t \text{ суток,}$$

где n – количество циклов;

Δt – длительность одного цикла.

В результате была получена длительность кампании ядерного топлива, равная:

$$T_{яТ} = 250 \text{ суток.}$$

Помимо определения длительности кампании, было проведено сравнение спектров плотностей потоков нейтронов на начало и конец кампании ядерного топлива, которое можно наблюдать на рисунке 15.

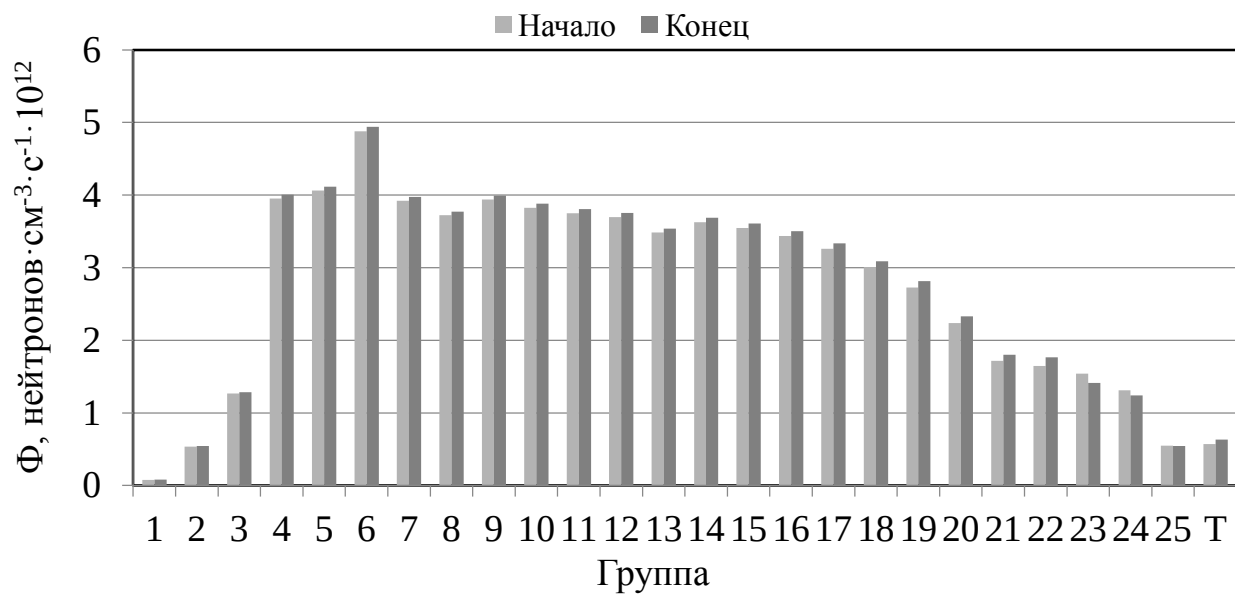


Рисунок 15 – Спектра плотностей потоков нейтронов на начало и конец кампании ЯТ

Также был построен график изменения $k_{эф}$, который можно наблюдать на рисунке 16.

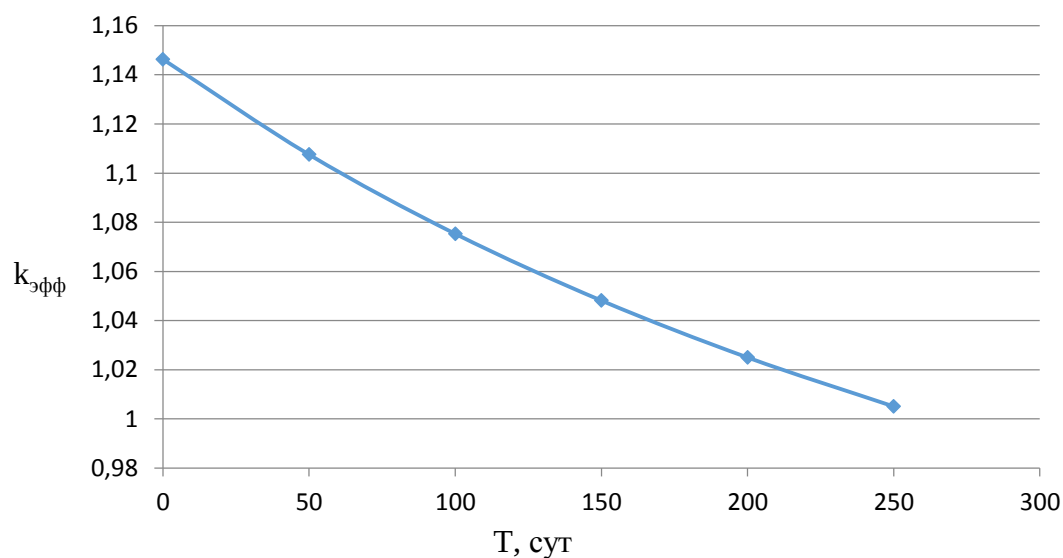


Рисунок 16 – Изменение $k_{эфф}$ в зависимости от времени работы ЯР

Данные многогруппового расчета и таблица переходов представлены в таблице Д.1 и Е.1 (Приложение Д и Е).

3. Финансовый менеджмент

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Очевидно что, на данный момент остро встает вопрос о необходимости планирования и организации научно-исследовательских работ. Заметим что, важно не только разработать ту или иную научную тему, но и провести ее анализ с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения, иными словами, необходимо определить затраты на проведение научно-исследовательской работы, продолжительность работ, таким образом определив экономическую эффективность и конкурентоспособность разрабатываемой в настоящей работе ядерной энергетической установки (ЯЭУ).

В ходе выполнения работы был разработан проект ядерной энергетической установки типа УГР с водным теплоносителем. Были рассчитаны нейтронно-физические характеристики для ЯЭУ, основной целью которой является производство электрической энергии. Целевым рынком данного исследования, будут являться государственные корпорации по энергетике, в частности по атомной энергетике.

Отдельной актуальностью применением данного исследования различными госкорпорациями, является экспорт данной продукции в другие страны мира, для развития сотрудничества в области ядерной энергетики и для продвижения данного проекта.

3.2 Анализ конкурентных технических решений

В данной работе рассмотрен уран-графитовый канальный реактор на тепловых нейтронах с кипящей водой в качестве теплоносителя. Наиболее подходящими для сравнения являются ЯЭУ отечественных разработок, т.к. Россия является одной из лидирующих стран по уровню развития атомной энергетики и именно отечественные разработки востребованы на рынке

атомной энергии. Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта приведенная в таблица 1. Конкурентами для сравнения являются реакторы типа ВВЭР-1000 и реактор типа РБМК-1000. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Стоимость топлива	0,02	5	4	5	0,1	0,08	0,1
2. Удобство в эксплуатации	0,04	3	4	3	0,12	0,16	0,12
3. Стоимость теплоносителя	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
4. Надежность	0,05	3	5	4	0,15	0,25	0,2
5. Возможность перегрузки топлива	0,1	5	2	5	0,5	0,2	0,5
6. Безопасность	0,3	3	4	3	0,9	1,2	0,9
7. Уровень шума	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность	0,1	2	5	3	0,2	0,5	0,3
2. Уровень проникновения на рынок	0,1	2	5	3	0,2	0,5	0,3
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	4	5	3	0,8	1	0,6
Итого	1	34	41	36	3,33	4,25	3,38

Выше представлен анализ конкурентоспособности ЯЭУ, представленной в данной работе, среди отечественных разработок и ВВЭР-1000 (B_{k1}) и РБМК-1000 (B_{k2}). Из анализа видно, что преимуществом обладает отечественные реактора типа ВВЭР-1000. Но из таблицы видно, что и разрабатываемый проект имеет свои преимущества, и также свои недостатки. По своим свойствам, он схож с отечественным реактором типа РБМК-1000.

3.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта.

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

- использования канальной схемы имеем возможность увеличения мощности установки, не увеличивая размеров активной зоны ядерного реактора;
- возможность перегрузки топлива в реакторе, не останавливая его;
- низкое обогащение топлива.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.

Слабыми сторонами можно назвать следующие свойства и особенности исследуемой ЯЭУ:

- необходимость поддержания определенной температуры чтобы теплоноситель не затвердел;
- пористость графита.

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

например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

К возможностям данной ЯЭУ можно отнести:

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

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

К угрозам можно отнести:

- природные катаклизмы;
- снижение государственного финансирования и ввода в эксплуатацию новых типов ЯЭУ;
- несанкционированные действия на ЯЭУ;

В таблице 2 представлен SWOT-анализ в виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Использование канальной схемы имеем возможность увеличения мощности установки, не увеличивая размеров активной зоны ядерного реактора; С2. Возможность перегрузки топлива в реакторе, не останавливая его; С3. Низкое обогащение топлива	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Множества трубопроводов и ответвлений в канальной схеме, что требует для работы участия высококвалифицированного персонала; Сл2. Пористость графита; Сл3. Подогрев теплоносителя.
Возможности: В1.Снижение стоимости электроэнергии. В2.Предоставление рабочих мест. В3.Расширение производства и мощностей для обеспечения работоспособности ЯЭУ	1. Увеличение мощности ЯЭУ приведет к снижению цен на электричество. 2. Увеличение мощности приведет к увеличению персонала ЯЭУ. 3. Увеличение персонала приведет к увеличению рабочих мест.	1. Высококвалифицированный персонал обеспечит безопасность работы ЯЭУ.
Угрозы: У1. Природные катаклизмы. У2.Снижение государственного финансирования и ввода в эксплуатацию новых типов установок. У3. Несанкционированные действия на ЯЭУ.	1. Возможность увеличения мощности влечет за собой несанкционированных действий в отношении ЯЭУ. 2. Постоянная работа реактора и возможность увеличения мощности вызывает дополнительный интерес у государства.	1.Выбор площадки для строительства АЭС с малой сейсмоактивностью и подверженности природным катаклизмам. 2. Отказ от использования натриевого теплоносителя из-за больших затрат на подогрев

Проанализировав характер научно-технической исследование можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями страны-партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Данная стратегия выбрана ввиду того, что предприятие, заинтересованное в ЯЭУ на российском рынке, одно

(Росэнергоатом). В свою очередь, данное предприятие требует тесного взаимодействия с другими производственными компаниями.

3.4 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по уран-графитовым реакторам	Бакалавр
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, бакалавр
	4	Календарное планирование работ по теме реактор типа УГР	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований конструкции реактора и активной зоны	Бакалавр
	6	Разработка чертежей и спецификации	Бакалавр
	7	Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога реактора РБМК-1000	Руководитель, бакалавр
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ результатов и планирование дальнейших действий при расчёте ВКР	Руководитель
Разработка технической документации и проектирование	9	Выбор конструкции реактора УГР	Бакалавр
	10	Разработка чертежей основных узлов конструкции реактора УГР	Бакалавр
	11	Оценка эффективности и применения данного изделия в производстве	Руководитель, бакалавр
Оформление отчета по ВКР	12	Проверка правильности выполнения ГОСТа и пояснительной записки	Руководитель, бакалавр
	13	Представление результатов работы по проекту	Руководитель, бакалавр, лица, представляющие заинтересованную компанию

3.5 Определение трудоемкости выполнения работ

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

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения

ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot t_{\min i} + 2 \cdot t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

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

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

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

3.6 Разработка графика проведения научного исследования

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

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

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

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

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; 365

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; 52

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году. 14

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22,$$

$$t_{\min 1} = 1,$$

$$t_{\max 1} = 3,$$

$$T_{p1} = \frac{1,8}{1} = 1,8,$$

$$T_{k1} = 1,8 \cdot 1,22 = 2.$$

Все значения полученные при расчетах по вышеприведенным формулам были сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительно сть работ в рабочих днях T_{pi}		Длитель ность работ в календа рных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел- дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож\ i}$, чел-дни					
	Б	Р	Б	Р	Б	Р	Б	Р	Б	Р
1. Составление и утверждение задания	-	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	2
2. Подбор и изучение материалов по уран-графитовым реакторам	6	-	8	-	6,8	-	6,8	-	8	-
3. Выбор направления исследований	1	1	2	2	1,4	1,4	0,7	0,7	1	1
4. Календарное планирование работ по теме реактор типа УГР	-	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	2
5. Проведение теоретических расчетов и обоснований конструкции реактора и активной зоны	9	-	17	-	12,2	-	12,2	-	15	-
6. Разработка чертежей и спецификации	3	-	5	-	3,8	-	3,8	-	5	-
7. Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога реактора РБМК-1000	1	1	2	2	1,4	1,4	0,7	0,7	1	1
8. Анализ результатов и планирование дальнейших действий при расчёте ВКР	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2
9. Выбор конструкции реактора УГР	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	2	-
10. Разработка чертежей основных узлов конструкции реактора УГР	3	-	5	-	3,8	-	3,8	-	5	-
11. Оценка эффективности и применения данного изделия в производстве	2	2	3	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
12. Проверка правильности выполнения ГОСТа и пояснительной записки	2	2	3	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
13. Представление результатов работы по проекту	7	2	10	3	8,2	2,4	4,1	2,4	5	3

3.7 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

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

3.8 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_{\text{м}} = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{\text{расх}i} ,$$

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

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

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 5.

Таблица 5 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Бумага	шт.	150	0,38	57
2. Ручка	шт.	2	12	24
3. Карандаш	шт.	2	8	16
4. Ластик	шт.	1	10	10
Итого				107

В ходе данной работы не рассчитываются амортизационные отчисления, так как в работе используется только компьютер стоимостью ниже 20000 рублей, а амортизационные отчисления рассчитываются, если стоимость оборудования выше 20000 рублей.

3.9 Основная заработная плата исполнителей темы

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

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

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

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $З_{осн}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

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

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

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 6).

Таблица 6 — Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p,$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{\text{тс}}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $Z_{тс}$);

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

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 7.

Таблица 7 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	7000	1,3	9100	606,7	15	9100
Бакалавр	1705	1,3	2216,5	92	36,3	3352
Итого						12452

3.10 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

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

На 2015 г. в соответствии с Федеральным закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году водится пониженная ставка – 27,1%. Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель+Бакалавр
Основная заработная плата, руб.	12452
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271
Итого	3374

3.11 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, интернета и т.д.

Расчет накладных расходов представлен в таблице 9

Таблица 9 – Накладные расходы

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Электроэнергия	кВт·ч	65	5,8	377
2. Печать на листе А4	шт.	150	2	300
3. Доступ в интернет	месяц	2	350	700
Итого				1377

3.12 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	107
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	12452
3. Отчисления во внебюджетные фонды	3374
4. Накладные расходы	1632
Бюджет затрат НТИ	17565

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

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

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

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

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

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

Для сравнения был выбран аналогичный проект реакторной установки УГР с бюджетом затрат НТИ 83449 рублей.

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат

разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{37878,84}{83449} = 0,45.$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{83449}{83449} = 1.$$

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Оценка характеристик исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Проект	Аналог
1. Стоимость топлива	0,2	5	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	3	3
3. Стоимость теплоносителя	0,15	4	3
4. Надежность	0,2	3	3
5. Возможность перегрузки топлива	0,05	5	5
6. Безопасность	0,25	3	3
ИТОГО	1	22	21

$$I_{\text{проект}} = 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,05 = 3,65.$$

$$I_{аналог} = 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,05 = 3,5.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{испi}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{проект} = \frac{I_{р-проект}}{I_{финр}^{проект}} = \frac{3,65}{0,45} = 8,1,$$

$$I_{аналог} = \frac{I_{р-аналог}}{I_{финр}^{аналог}} = \frac{3,5}{1} = 3,5.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 11) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{ср.п} = \frac{I_{проект}}{I_{аналог}} = \frac{8,1}{3,5} = 2,32$$

$$\mathcal{E}_{ср.а} = \frac{I_{аналог}}{I_{проект}} = \frac{3,5}{8,1} = 0,43$$

Таблица 11 – Эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Проект	Аналог
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,45	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,65	3,5
3	Интегральный показатель эффективности	8,1	3,5

Сравнивая данные проекта и аналога, можно сделать вывод, что эффективным вариантом является предоставляемый проект.

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

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

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (15)$$

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

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

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

Для сравнения был выбран аналогичный проект реакторной установки РБМКП-2400 с бюджетом затрат НТИ 95311,21 рублей.

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

$$I_{\text{финр}}^{\text{проект}} = \frac{66871,79}{95311,21} = 0,7$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{аналог}} = \frac{95311,21}{95311,21} = 1$$

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (16)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Представляемый проект	Аналог
1. Надежность	0,25	5	4
2. Безопасность	0,15	4	5
3. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,15	5	5
4. Длительность эксплуатации	0,20	4	3
5. Износостойкость	0,25	4	4
ИТОГО	1	22	21

$$I_{\text{проект}} = 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,25 = 4,4$$

$$I_{\text{аналог}} = 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,25 = 4,1$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{проект} = \frac{I_{р-проект}}{I_{финр}^{проект}} = \frac{4,4}{0,7} = 6,29,$$

$$I_{аналог} = \frac{I_{р-аналог}}{I_{финр}^{аналог}} = \frac{4,1}{1} = 4,1. \quad (17)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 14) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{ср.п} = \frac{I_{проект}}{I_{аналог}} = \frac{6,29}{4,1} = 1,53$$

$$\mathcal{E}_{ср.а} = \frac{I_{аналог}}{I_{проект}} = \frac{4,1}{6,29} = 0,65 \quad (18)$$

Таблица 14 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Представляемый проект	Аналог
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,7	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,4	4,1
3	Интегральный показатель эффективности	6,29	4,1

Сравнивая значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что более эффективным вариантом является предоставляемый проект.

Заключение

В результате проделанной работы для заданного уран-графитового реактора с жидкометаллическим теплоносителем выбраны параметры материалов и элементов конструкций, входящих в состав активной зоны.

Был выполнен предварительный расчет реактора, рассчитаны ядерно-физические характеристики для «холодного» и «горячего» состояния реактора при обогащении 2,4%, а также эффективные коэффициенты размножения для них, которые составили $k_{эф} = 1,68$ для «холодного» и $k_{эф} = 1,66$ для «горячего». Произведена оптимизация ячейки и расчет температурного коэффициента реактивности.

Была рассчитана длительность кампании многогрупповым итерационным процессом. Определены параметры 26 групп нейтронов, а так же получен спектр потоков нейтронов. Длительность кампании получилась равна 250 суток.

Также были рассчитаны стационарные концентрации ксенона и самария, отравляющие ядерный реактор во время его работы.

Список использованных источников

1. Бойко В.И. и др. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие /Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н. – Томск: Томский государственный университет, 2002.
2. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
4. Кукин П.П. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств: учеб. Пособие / П.П. Кукин, В.Л. Лапин – М.: Высшая школа, 1999. – 318с.
5. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 №181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07. – С. 4
6. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.
7. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.
8. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с.

Приложение А

Таблица А.1 – Значение поправок на самоэранирование материалов f при рабочих температурах

№ Группы	σ_0^{U235}	f_f^{U235}	f_c^{U235}	σ_0^{U238}	f_c^{U238}	σ_0^{C12}	f_c^{C12}	σ_0^{Na23}	f_c^{Na23}	σ_0^{Pu239}	f_f^{Pu239}	f_c^{Pu239}	σ_0^{Cr52}	f_c^{Cr52}	σ_0^{Ni59}	f_c^{Ni59}	σ_0^{Fe56}	f_c^{Fe56}
1	7,64E+03			1,90E+03		3,38E-02	1,00	3,48E+02		1,09E+05			1,12E+03		2,55E+03		3,09E+02	
2	9,21E+03			2,30E+03		3,77E-02	1,00	4,20E+02		1,31E+05			1,36E+03		3,08E+03	1	3,73E+02	1
3	1,26E+04			3,15E+03		3,88E-02	1,00	5,76E+02		1,80E+05			1,87E+03		4,24E+03	1	5,14E+02	0,99 91
4	1,14E+04			2,84E+03		3,77E-02	1,00	5,18E+02		1,62E+05			1,68E+03		3,82E+03	1	4,62E+02	0,99 85
5	1,61E+04			4,01E+03		4,38E-02	1,00	7,32E+02		2,29E+05			2,39E+03		5,41E+03	1	6,55E+02	0,99
6	1,95E+04			4,88E+03		5,37E-02	1,00	8,90E+02	1	2,78E+05			2,90E+03		6,58E+03	0,99	7,96E+02	0,98
7	2,51E+04			6,26E+03		4,69E-02	1,00	1,14E+03	0,9813	3,57E+05			3,74E+03		8,48E+03	0,99	1,02E+03	0,98
8	2,70E+04			6,73E+03		5,29E-02	1,00	1,23E+03	0,9816	3,84E+05			4,02E+03	0,9935	9,11E+03	0,98	1,10E+03	0,97
9	2,83E+04			7,06E+03		6,77E-02	1,00	1,29E+03	0,9444	4,03E+05			4,20E+03	0,9943	9,54E+03	0,98	1,15E+03	0,9
10	2,91E+04			7,26E+03		9,89E-02	1,00	1,33E+03	0,8542	4,15E+05			4,30E+03	0,9947	9,75E+03	0,93	1,18E+03	0,66
11	2,95E+04	1	1	7,37E+03		7,10E-02	1,00	1,35E+03	1	4,21E+05	1	1	4,40E+03	0,9904	9,96E+03	0,84	1,21E+03	0,98
12	2,98E+04	1	1	7,43E+03	0,9944	1,08E-01	1,00	1,36E+03	1	4,24E+05	1	1	4,40E+03	0,9927	9,97E+03	1	1,21E+03	0,95
13	3,17E+04	1	1	7,91E+03	1	4,20E-01	1,00	1,35E+03	0,5913	4,52E+05	1	1	4,40E+03	0,9633	9,98E+03	0,98	1,21E+03	0,98
14	2,96E+04	1	1	7,39E+03	0,9245	8,67E-02	1,00	1,35E+03	1	4,22E+05	1	1	4,40E+03	0,9096	9,98E+03		1,21E+03	0,78
15	2,96E+04	1	1	7,40E+03	0,8292	9,13E-02	1,00	1,36E+03		4,23E+05	1	1	4,41E+03	0,9021	9,99E+03		1,21E+03	
16	2,97E+04	1	1	7,40E+03	0,7152	9,30E-02	1,00	1,36E+03		4,23E+05	1	1	4,41E+03		9,99E+03		1,21E+03	
17	2,99E+04	1	1	7,41E+03	0,359	1,36E-01	1,00	1,37E+03		4,27E+05	1	1	4,45E+03		1,01E+04		1,22E+03	
18	2,98E+04	1	1	7,42E+03	0,2985	1,15E-01	1,00	1,36E+03		4,25E+05	1	1	4,43E+03		1,01E+04		1,21E+03	
19	3,02E+04	1	1	7,42E+03	0,2172	1,82E-01	1,00	1,38E+03		4,31E+05	1	1	4,49E+03		1,02E+04		1,23E+03	
20	3,01E+04	1	1	7,43E+03	0,2772	1,74E-01	1,00	1,38E+03		4,30E+05	1	1	4,49E+03		1,02E+04		1,23E+03	
21	3,04E+04	1	1	7,42E+03	0,3122	2,16E-01	1,00	1,39E+03		4,34E+05	1	1	4,53E+03		1,03E+04		1,24E+03	
22	2,96E+04	1	1	7,41E+03		9,02E-02	1,00	1,36E+03		4,23E+05			4,40E+03		9,98E+03		1,21E+03	
23	2,96E+04	1	1	7,42E+03		9,45E-02	1,00	1,36E+03		4,23E+05			4,41E+03		1,00E+04		1,21E+03	
24	2,97E+04			7,43E+03		1,02E-01	1,00	1,36E+03		4,24E+05	1	1	4,42E+03		1,00E+04		1,21E+03	
25	2,99E+04			7,51E+03		1,53E-01	1,00	1,37E+03		4,25E+05	1	1	4,48E+03		1,02E+04		1,22E+03	
T _{хол}	–	3,24	1,00	–	3,40	–	3,39	–	3,39	–	3,39		–	3,39	–	3,39	–	3,39
T _{гор}	1972,05	0,51	1,00	651,65	0,50	526,64	0,50	183,58	0,50	234,20	0,50		5310,29	0,50	10613,57	0,50	1339,94	0,50

Приложение Б

Таблица Б.1 – Многогрупповые константы

i	ε_i	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$B^2, \text{см}^{-2}$	D, см	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_R, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f \nu_f$
1	0,0200	0,0754	3,78676E-05	4,4238	3,12E-04	0,0583	6,96E-05	2,49E-04
2	0,0980	0,1000	3,82649E-05	3,3333	6,68E-05	0,0519	4,10E-05	1,32E-04
3	0,1900	0,1523	3,86892E-05	2,1883	5,15E-05	0,0601	4,15E-05	1,25E-04
4	0,2680	0,1331	3,8571E-05	2,5053	4,60E-05	0,0394	3,62E-05	1,02E-04
5	0,1960	0,1839	3,88299E-05	1,8126	2,05E-05	0,0537	7,39E-06	2,37E-05
6	0,1350	0,2263	3,89579E-05	1,4729	1,89E-05	0,0545	6,08E-06	1,95E-05
7	0,0580	0,3038	3,91003E-05	1,0971	2,19E-05	0,0736	6,97E-06	2,17E-05
8	0,0220	0,3304	3,91338E-05	1,0088	2,87E-05	0,0795	8,40E-06	2,51E-05
9	0,0090	0,3506	3,91559E-05	0,9509	4,05E-05	0,0756	1,04E-05	3,02E-05
10	0,0030	0,3609	3,91663E-05	0,9236	5,44E-05	0,0772	1,31E-05	3,75E-05
11	0,0010	0,3662	3,91714E-05	0,9101	6,83E-05	0,0789	1,68E-05	4,70E-05
12		0,3692	3,91742E-05	0,9028	8,71E-05	0,0790	2,17E-05	5,92E-05
13		0,3938	3,91957E-05	0,8464	1,43E-04	0,0819	2,67E-05	7,36E-05
14		0,3674	3,91725E-05	0,9072	2,23E-04	0,0789	3,61E-05	9,84E-05
15		0,3678	3,91728E-05	0,9063	3,30E-04	0,0788	5,43E-05	1,52E-04
16		0,3679	3,91729E-05	0,9060	4,36E-04	0,0788	7,91E-05	2,26E-04
17		0,3718	3,91766E-05	0,8964	1,26E-03	0,0788	1,09E-04	3,13E-04
18		0,3696	3,91745E-05	0,9019	1,32E-03	0,0788	1,73E-04	5,80E-04
19		0,3757	3,91801E-05	0,8871	4,00E-03	0,0788	2,22E-04	5,96E-04
20		0,3748	3,91793E-05	0,8894	5,71E-03	0,0788	2,22E-04	8,30E-04
21		0,3789	3,91829E-05	0,8798	1,10E-02	0,0788	1,83E-04	5,62E-04
22		0,3676	3,91726E-05	0,9068	3,03E-04	0,0788	9,88E-05	2,71E-04
23		0,3678	3,91728E-05	0,9064	4,76E-04	0,0788	1,73E-04	4,82E-04
24		0,3682	3,91732E-05	0,9053	9,19E-04	0,0788	3,16E-04	1,04E-03
25		0,3714	3,91762E-05	0,8974	4,14E-03	0,0788	7,66E-04	6,29E-03
T		0,3718	3,91765E-05	0,8966	4,47E-03	0	1,71E-03	6,10E-03

Приложение В

Таблица В.1 – Матрица переходов $\Sigma_R^{i \rightarrow k}, \text{см}^{-1} \cdot 10^{-3}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1		28,8	5,8	16,6	4,3	1,8	0,9																			
2			44,7	0,2	4,3	1,8	0,9																			
3				59,7	0,2	0,1	0,1																			
4					39	0,3	0,1																			
5						53,5	0,1																			
6							54,5																			
7								73,6																		
8									79,5																	
9										75,6																
10											77,2															
11												78,9														
12													79													
13														81,9												
14															78,9											
15																78,8										
16																	78,8									
17																		78,8								
18																			78,8							
19																				78,8						
20																					78,8					
21																						78,8				
22																							78,8			
23																								78,8		
24																									78,8	
25																										78,8

ФЮРА.562527.132

Перв. примен.

Справ. N°

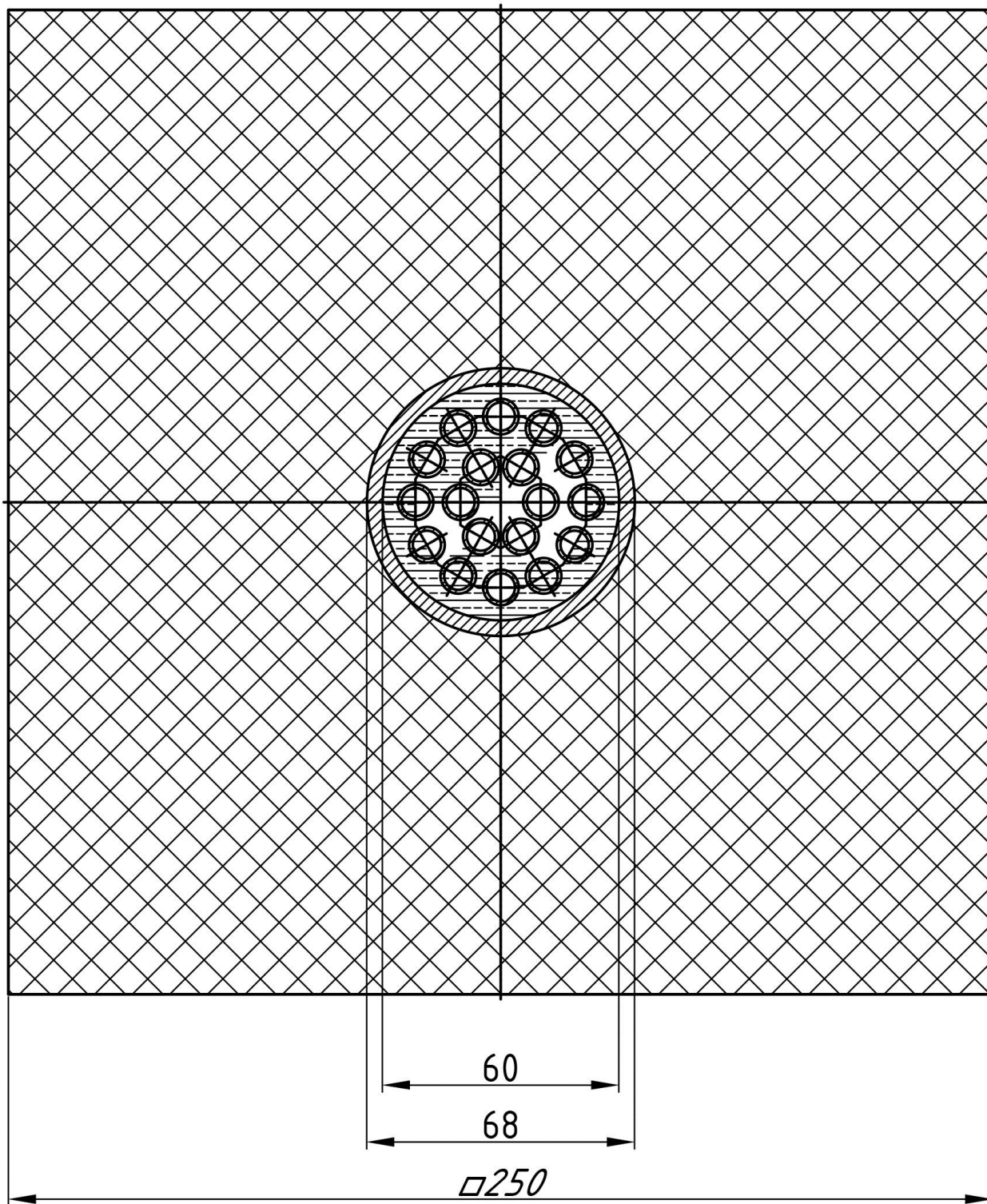
Подп. и дата

Инв. N дубл.

Взам. инв. N°

Подп. и дата

Инв. N° подл.



ФЮРА.562527.132 СБ

Ячейка
Приложение Г

Лит.	Масса	Масштаб
У		1:2
Лист 116		Листов 1

НИ ТПУ ФТИ
Группа ОАЗВ

Копировал

Формат А4

Перв. примен.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Справ. №						Документация		
						Ячейка реактора	1	
						Сборочные единицы		
	Б4		1	ФЮРА.14.03.02.132.001	Топливная таблетка	18		
	Б4		2	ФЮРА.14.03.02.132.002	Оболочка ТВЭЛ	18		
	Б4		3	ФЮРА.14.03.02.132.003	Центральный стержень	1		
	Б4		4	ФЮРА.14.03.02.132.004	Технологический канал	1		
	Б4		5	ФЮРА.14.03.02.132.005	Графитовый блок	1		
Подп. и дата								
Взам. инв. №								
Инв. № дубл.								
Подп. и дата								
Инв. № подл.								
					ФЮРА.14.03.02.132 Сп			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.	Нагаев Е.В.							
Пров.	Исаченко Д.С.							
Н.контр.								
Утв.	Долматов О.Ю.							
					Спецификация		Лит. Лист Листов	
							117 1	
							НИ ТПУ ФТИ Группа ОАЗВ	