

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 мощностью 900 МВт со свинцовым теплоносителем
УДК 621.039.577.001.24

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3В	Шкляренко Евгений Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ ФТИ	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.филос.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	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	
Р1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
Р2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
Р3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
Р4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
Р5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р8	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).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработке способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой ФЭУ
 _____ 10.04.2017 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	Шкляренко Евгений Владимирович

Тема работы:

Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа УГР со свинцовым теплоносителем	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

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 900 [МВт] - Ядерное горючее UN - Обогащение урана 2% - Теплоноситель Pb - Температура на входе 330 [°C] - Температура на выходе 480 [°C] - ТВЭЛы стержневые с наружным охлаждением - Материалы оболочек ТВЭЛов и кассет сталь IX18N9T
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 - Многогрупповой расчет - Свертка - Расчёт нуклидного состава (в результате отравления, шлакования)
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	- Презентация - Чертеж ячейки

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

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ	Исаченко Д.С.	.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3В	Шкляренко Евгений Владимирович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А3В	Шкляренко Евгений Владимирович

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

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

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

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3В	Шкляренко Евгений Владимирович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А3В	Шкляренко Евгений Владимирович

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны):</i>	– 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. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	– электробезопасность; – пожарная безопасность; – требование охраны труда при работе с ПЭВМ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью; – предлагаемые средства защиты.
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i>	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3В	Шкляренко Евгений Владимирович		

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)
	<i>Выдача задания</i>	
	<i>Выбор конструктивной схемы</i>	
	<i>Расчет критических параметров проектируемого реактора</i>	
	<i>Расчет характеристик «горячего реактора», многогрупповой нейтронно-физический расчет</i>	
	<i>Расчет эффектов реактивности</i>	
	<i>Сдача работы</i>	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ	Исаченко Д.С.			

СОГЛАСОВАНО:

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

Реферат

Выпускная квалификационная работа 107 с., 24 рис., 32 табл., 11 источников, 2 прил., 2 чертежа, 1 спецификация.

Ключевые слова: реактор, отравление, выгорание, шлакование, воспроизводство, нейтронно-физический расчет, многогрупповой расчет.

Объектом исследования является ядерный реактор мощностью 900 МВт с топливом UN и обогащением 10 % и с теплоносителем Pb.

Цель работы – выполнение нейтронно-физического расчёта реактора, состоящего в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров, удовлетворяющих поставленным требованиям.

В процессе исследования проводились расчеты нейтронно-физических характеристик реактора, на основании которых были получены таблицы и построены графики, а также нарисован рисунок; произведен расчет финансовой составляющей работы, описаны внешние факторы, влиявшие на выполнение работы. В результате исследования произведён нейтронно-физический расчет данного реактора, в частности оценены размеры активной зоны, рассчитаны коэффициенты размножения «холодного» и «горячего» реакторов, произведен расчет реактора на конец кампании.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: реактор типа УГР, тепловая мощность – 900 МВт, топливо – UN, обогащение 10%, теплоноситель – Pb, ТВЭЛы – стержневые с наружным охлаждением, материал оболочек ТВЭЛов и кассет – сталь IX18N9T.

Степень внедрения: высокая, проект может использоваться в настоящее время и при продолжении дальнейших исследований.

Область применения: ядерная энергетика.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая. В будущем планируется продолжение более детального расчета реактора данного типа.

Перечень определений

Ядерный реактор: Устройство, предназначенное для организации управляемой самоподдерживающейся цепной реакции деления, сопровождаемой выделением энергии.

Кампания ядерного реактора: Время работы реактора с одной и той же загрузкой ядерного топлива.

Кампания ядерного топлива: Время работы топлива в пересчете на полную мощность реактора; время, в течение которого топливо находится в реакторе.

Выгорание ядерного топлива: Снижение концентрации любого нуклида в ядерном топливе, вследствие ядерных превращений этого нуклида при работе реактора.

Отравление ядерного реактора: Процесс накопления в реакторе короткоживущих продуктов деления, участвующих в непроизводительном захвате нейтронов и тем самым снижающих запас реактивности реактора при их образовании.

Шлакование ядерного топлива: Процесс накопления в работающем реакторе стабильных и долгоживущих продуктов деления, участвующих в непроизводительном захвате нейтронов и тем самым снижающих запас реактивности реактора.

Обозначения и сокращения

МэВ – мегаэлектронвольт;

РБМК – реактор большой мощности канальный;

ТКР– температурный коэффициент реактивности;

ТЭР– температурный эффект реактивности;

УГР– уран графитовый реактор.

Оглавление

Введение.....	15
1.1 Основные характеристики расчетного реактора	16
1.1.1 Достоинства и недостатки уран-графитовых реакторов	16
1.1.2 Жидкий свинец, как теплоноситель: достоинства и недостатки	17
1.1.3 Достоинства и недостатки нитридного топлива.....	18
1.2 Нейтронно-физические параметры критического стационарного «холодного» реактора	20
1.2.1 Предварительный тепловой расчет.....	20
1.2.2 Расчет «холодного» реактора	23
1.2.2.1 Расчет концентраций.....	23
1.2.2.2 Микроскопические сечения.....	25
1.2.2.3 Макроскопические сечения.....	27
1.3 Расчет коэффициента размножения бесконечной среды	31
1.3.1 Расчет выхода нейтронов на один акт поглощения теплового в горючем.....	31
1.3.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах	31
1.3.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов	33
1.3.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата.....	35
1.4 Расчет эффективного коэффициента размножения	36
1.4.1 Коэффициент диффузии и длина диффузии в решетке	36
1.4.2 Возраст нейтронов в решетке	37
1.4.3 Геометрический параметр.....	38
1.4.4 Оптимизация параметров ячейки	39
1.5 Нейтронно-физические параметры критического стационарного «горячего» реактора.....	43
1.5.1 Температурные эффекты реактивности	43
1.5.1.1 Зависимость поперечных сечений от температуры.....	43
1.5.1.2 Расчет эффективного коэффициента размножения «горячего» реактора.....	46

1.6	Многогрупповой расчет	48
1.6.1	Методика многогруппового расчета.....	48
1.6.2	Определение сходимости итерационного процесса для реактора.....	50
1.6.3	Методика нормирования плотности потока нейтронов и определения коэффициента размножения в конечной среде.....	53
1.6.4	Сравнение спектра плотностей потоков нейтронов и коэффициента размножения для горячего реактора	54
1.6.5	Компенсация запаса реактивности.....	55
1.6.6	Определение нуклидного состава и длительности кампании ядерного топлива	56
1.7	Расчет ядерного реактора с помощью программного обеспечения WIMS- D5	61
1.7.1	Расчет «холодного» реактора	61
1.7.2	Расчет «горячего» реактора	62
1.7.3	Сравнение полученных данных	63
1.8	Отравление реактора	64
1.8.1	Отравление ксеноном-135.....	64
1.8.1.1	Стационарное отравление ксеноном-135.....	64
1.8.1.2	Нестационарное отравление ксеноном-135.....	66
1.8.2	Отравление самарием-149.....	69
1.8.2.1	Стационарное отравление самарием-149.....	69
1.8.2.2	Нестационарное отравление самарием-149.....	71
2	Социальная ответственность	74
2.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	74
2.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	76
2.2.1	Организационные мероприятия	76
2.2.2	Технические мероприятия	76
2.2.3	Условия безопасной работы	79
2.2.4	Электробезопасность	81

2.2.5	Пожарная и взрывная безопасность.....	82
3	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	84
3.1	Потенциальные потребители результатов исследования	84
3.2	Технология QuaD	85
3.3	SWOT-анализ.....	86
3.4	Планирование научно-исследовательских работ	89
3.4.1	Структура работ в рамках научного исследования	89
3.4.2	Определение трудоемкости выполнения работ	90
3.4.3	Разработка графика проведения научного исследования.....	91
3.4.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	93
3.5	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	98
	Заключение	102
	Список использованных источников	103
	Приложение А	104
	Приложение Б.....	106

Введение

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

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

Целью данной работы является выполнение оценочного нейтронно-физического расчета реактора, состоящего в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров, удовлетворяющего поставленным требованиям.

Решаемые задачи:

- Провести нейтронно-физический расчет «холодного» и «горячего» реактора;
- Выполнить оптимизацию геометрических параметров элементарной ячейки;
- Провести многогрупповой расчет «холодного» и «горячего» реактора для определения спектра плотности потока нейтронов;
- Сравнить полученные результаты с расчетом в WIMS.

1.1 Основные характеристики расчетного реактора

1.1.1 Достоинства и недостатки уран-графитовых реакторов

В Российской Федерации эксплуатируются три типа реакторов. Реакторы на быстрых нейтронах (БН-600, БН-800), которые занимают первое место по безопасности, водо-водяные реакторы (ВВЭР-1000) и уран-графитовые реакторы (РБМК-1000). Если при использовании реакторов типа ВВЭР не было ни одной серьезной аварии (в России), что подтверждает его безопасность, то с реакторами типа РБМК дело обстоит иначе. Что подтверждает тот факт, что расчет реакторов этого типа требует особой точности. Рассмотрим перечень достоинств и недостатков уран-графитовых реакторов на примере РБМК-1000.

Во-первых, существует возможность замены топлива без остановки реактора благодаря независимости каналов друг от друга, что ведет к повышению коэффициента использования установленной мощности. Во-вторых, пониженное, по сравнению с корпусным ВВЭР, давление воды в первом контуре. В-третьих, благодаря канальной конструкции можно избежать использования дорогостоящего корпуса. Следующим достоинством данного типа реакторов является отсутствие дорогостоящих и конструктивно сложных парогенераторов. Нет принципиальных ограничений на форму и размер активной зоны. Широкие возможности осуществления регулярного контроля состояния узлов активной зоны, например, труб технологических каналов, без необходимости остановки реактора, а также высокая ремонтпригодность. В реакторах данного типа малое «паразитное» поглощение нейтронов в активной зоне, а значит более благоприятный нейтронный баланс, и как следствие – более полное использование ядерного топлива. Незначительные коэффициенты реактивности по плотности теплоносителя. Наличие возможности наработки радионуклидов технического и медицинского назначения, а также легирования различных материалов. По сравнению с ВВЭР, нет необходимости использования борного регулирования. Более равномерное и глубокое выгорание топлива по сравнению с корпусными реакторами. А также это

топливо более дешевое из-за более низкой степени обогащения, хотя загрузка топливом выше. Но поскольку в топливном цикле используют переработку отработанного топлива от ВВЭР, это все же является плюсом. Поканальное регулирование расходов теплоносителя через каналы, позволяющее контролировать теплотехническую надежность активной зоны.

Не смотря на обилие плюсов данного типа реакторов, они имеют и ряд недостатков. А именно большое количество трубопроводов и различных вспомогательных подсистем, что требует наличие большого количества высококвалифицированного персонала. Большее количество активированных конструкционных материалов из-за больших размеров, остающихся после вывода из эксплуатации и требующих утилизации. Недостатки конструкции замедляющих модулей. Необходимость проведения поканального регулирования расходов, что может повлечь за собой аварии, связанные с прекращением расхода теплоносителя через канал.

1.1.2 Жидкий свинец, как теплоноситель: достоинства и недостатки

На сегодняшний день в качестве теплоносителя в реакторных установках используются такие вещества, как вода (H_2O , D_2O), газы (He, CO_2), жидкие металлы (Na, Pb, Pb-Bi) и другие экзотические виды теплоносителей. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Остановимся подробнее на свинце.

Жидкий свинец выбран в качестве теплоносителя для ряда инновационных ядерных энерготехнологий, в том числе для российской разработки с реакторной установкой БРЕСТ. По сравнению с натрием свинец, как теплоноситель, имеет три важных преимущества: высокую температуру кипения (2600 К при давлении 1 МПа), химическую пассивность при контакте с водой и воздухом и низкую собственную радиоактивность. Это позволяет реализовать преимущества быстрого реактора в отношении безопасности и экономики, упростить его конструкцию и управление. Кроме того, малые сечения замедления и поглощения нейтронов в свинце позволяют увеличить его объемную долю в активной зоне до 60%, снизить максимальную скорость до

1,8 м/с при существенном снижении потерь мощности на прокачку теплоносителя и высоком уровне его естественной циркуляции.

Недостатками свинца, из-за которых предпочтение было отдано натрию, являются: высокий удельный вес и более низкая теплопроводность свинца, что ограничивает скорость его прокачки и препятствует достижению высокой энергонапряженности для сокращения времени удвоения плутония. Растворение в свинце компонентов стали и его высокая коррозионная активность. Высокая температура плавления (600 К), приводящая к повышению температурного уровня всей системы и к опасности застывания свинца при нарушении режима охлаждения. Справедливости ради следует отметить, что последний недостаток свинца в определенных условиях может обернуться преимуществом. Например, при аварии с разгерметизацией первого контура жидкий теплоноситель при растекании затвердевает, достигнув температуры 600 К. Иными словами, происходит «самозалечивание» течи первого контура.

Что касается взаимодействия свинца с конструкционными сталями, то стендовые коррозионные испытания и термодинамические расчеты показали совместимость этих сталей с жидким свинцом при создании оксидных защитных покрытий. Определено, при какой концентрации растворенного в свинце кислорода происходит формирование и сохранение оксидных покрытий.

Свойства свинцового теплоносителя позволяют существенно упростить конструкцию реактора.

1.1.3 Достоинства и недостатки нитридного топлива

Соединение UN является наиболее стабильным. Мононитрид урана имеет гранецентрированную кубическую кристаллическую структуру, а его теоретическая плотность составляет 14,32 г/см³. Из сравнений температурных зависимостей теплопроводности UO₂, UC, UN следует, что теплопроводность UO₂ и UC уменьшается с ростом температуры, а теплопроводность UN увеличивается. UN имеет высокую теплопроводность.

Нитридное топливо имеет теплопроводность в области рабочих температур в 7 и плотность в 1,3 раза выше, чем у оксидного топлива. А также

хорошую совместимость с оболочками из нержавеющей сталей и с жидкометаллическими и газовыми теплоносителями – натрием, свинцом, гелием.

Недостатками нитридного топлива является образование экологически опасного C^{14} по реакции $N^{14} (n, p) C^{14}$. В нитридном топливе может быть использован азот, обогащенный по N^{15} изотопу, что значительно уменьшит количество образующегося C^{14} , приведет к экономии нейтронов и топлива и скомпенсирует затраты на обогащение азота.

1.2 Нейтронно-физические параметры критического стационарного «холодного» реактора

1.2.1 Предварительный тепловой расчет

Предварительная оценка размеров активной зоны, которые обеспечили бы нужный теплосъем при заданной мощности реактора:

$$V_{a.z.} = \frac{N}{N_0} \eta_v = \frac{900}{3} \cdot 1,1 = 330 \text{ м}^3,$$

$$D_{a.z.} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{a.z.}}{\pi \cdot m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 330}{\pi \cdot 0,8}} = 8,078 \text{ м} = 807,8174 \text{ см},$$

$$H_{a.z.} = m \cdot D_{a.z.} = 0,8 \cdot 807,8174 = 646,25392 \text{ см},$$

где $V_{a.z.}$ – объем, см^3 ;

$D_{a.z.}, H_{a.z.}$ – диаметр и высота активной зоны, см;

m – отношение высоты к диаметру (m равно от 0,8 до 1,1);

N – заданная мощность реактора;

N_0 – средняя удельная объемная нагрузка активной зоны, кВт/л (N_0 равно от 3 до 15 кВт/л);

η_v – коэффициент, учитывающий увеличение объема реактора вследствие размещения регулирующих стержней (η_v равно от 1,1 до 1,3).

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = N_0 \cdot K_v = 3 \cdot 2 = 6 \text{ кВт/л},$$

где K_v – объемный коэффициент неравномерности тепловыделения (K_v равен от 2 до 3).

В случае квадратной ячейки с заданным размером $a_{яч} = 25 \text{ см}$ площадь ячейки равна:

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

Периметр тепловыделяющей поверхности твэла:

$$\Pi_0 = \pi \cdot 2 \cdot r_{твэл} = 3,14 \cdot 2 \cdot 1 = 6,28 \text{ см},$$

где $r_{твэл} = 1 \text{ см}$ – радиус твэла.

Максимально допустимая тепловая нагрузка на поверхности тепловыделяющих элементов (определяет размеры активной зоны при заданном шаге решетки):

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{яч}}{0,116 \cdot \Pi_0 \cdot n} = \frac{6 \cdot 625}{116,2 \cdot 6,28 \cdot 18} = 0,285491 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч},$$

где Π_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛА, см;

n – число ТВЭЛОВ в сборке;

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

Площадь сечения прохода теплоносителя, приходящегося на один элемент, вычисляется по формуле:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot R_{TK}^2}{n} - \frac{\pi \cdot d_{TK}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5^2}{18} - \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 1,22173 \text{ см}^2,$$

где R_{TK} – радиус технологического канала ($R_{TK} = 5$ см);

n – число ТВЭЛОВ в сборке;

$d_{ТВЭЛ} = 2$ см – диаметр ТВЭЛА.

Средний удельный вес и теплоемкость для теплоносителя выбирались при рабочих параметрах, а именно:

$$t_{TH}^{раб} = t_{нл} + 20^\circ = 600 + 20 = 620 \text{ К},$$

$$P_{раб} = 10^5 \text{ Па}.$$

При данных параметрах:

$$\rho = 10,522 \text{ г/см}^3,$$

$$C_p = 142,457 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}.$$

Необходимая для эффективного отвода тепла скорость теплоносителя на входе в активную зону определяется в максимально напряженном тепловыделяющем элементе из уравнения баланса тепла:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{a.з.}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_1} = \frac{0,285491 \cdot 6,28 \cdot 646,25392}{3,6 \cdot 1,5 \cdot 10,522 \cdot 5,107212 \cdot 1,22173} = 3,268 \text{ м/с},$$

где K_z – осевой коэффициент неравномерности (K_z равен от 1,2 до 1,5).

S_1 – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один элемент, см³;

ρ – средний удельный вес теплоносителя при рабочих параметрах, г/см³;

Δi – разность теплосодержания теплоносителя на входе и на выходе:

$$\Delta i = C_p \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}) = 142,457 \cdot (753 - 603) \cdot 0,000239006 = 5,107212 \text{ Ккал/кг},$$

где C_p – теплоемкость при рабочих параметрах, Дж/кг · К.

Все исходные данные, справочные и выбранные из диапазона величины сведены в таблицу 1. Рассчитанные по формулам выше параметры приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Заданные величины

Величина	Значение
Заданная мощность (N), кВт	9·10 ⁵
Средняя удельная объемная нагрузка (N ₀), кВт/л	3
Коэффициент увеличения объема (η_v)	1,100
Отношение высоты активной зоны к диаметру (m)	0,800
Объемный коэффициент неравномерности (K _v)	2
Число твэлов в сборке (n)	18
Температура теплоносителя на входе (T _{вх}), °С	330
Температура теплоносителя на выходе (T _{вых}), °С	480
Плотность теплоносителя на входе ($\rho_{\text{вх}}$), г/см ³	10,630
Плотность теплоносителя на выходе ($\rho_{\text{вых}}$), г/см ³	10,414
Теплоемкость на входе (C _{рвх}), Дж/кг·град	140,885
Теплоемкость на выходе (C _{рвых}), Дж/кг·град	144,029

Таблица 2 – Результаты расчета

Величина	Значение
Объем активной зоны (V _{а.з.}), м ³	330
Диаметр активной зоны (D _{а.з.}), см	807,817
Высота активной зоны (H _{а.з.}), см	646,254
Максимальная удельная объемная нагрузка (N _{0max}) кВт/л	6
Площадь ячейки (S _{яч}), см ²	625
Периметр тепловыделяющей поверхности (Π ₀), см	6,280
Максимальная тепловая нагрузка (q _{max}), Гкал/м ² ч	0,285
Площадь прохода теплоносителя (S ₁), см ²	1,222
Средняя плотность теплоносителя (ρ), г/см ³	10,522

Продолжение таблицы 2

Величина	Значение
Средняя теплоемкость (C_p), Дж/кг·град	142,457
Разность теплосодержания теплоносителя (Δi), ккал/кг	5,107
Скорость теплоносителя на входе (v), м/с	3,268

1.2.2 Расчет «холодного» реактора

Поскольку ячейка реактора состоит из нескольких зон с различными ядерными свойствами, необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, замедляющие свойства) для каждой зоны (горючее, оболочка, теплоноситель, замедлитель).

1.2.2.1 Расчет концентраций

Вычисление ядерных концентраций производится для каждого элемента активной зоны. Для i -го элемента справедлива формула:

$$N_i = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_i}{A_i}, \text{ ядер/см}^3,$$

где ρ_i – плотность i -го элемента, г/см³,

A_i – атомная масса i -го элемента.

Если в качестве топлива используют уран, обогащенный до величины C_5 (%) изотопом U^{235} , то:

$$N_5 = N_U \cdot \frac{C_5}{100},$$

$$N_8 = N_U \cdot (1 - \frac{C_5}{100}),$$

где N_U – концентрация ядер урана.

Концентрация ядер в молекулярном соединении:

$$N_i = x \cdot N_{\text{мол}},$$

где x – число атомов i -го сорта в молекуле (в соответствии с химической формулой);

$N_{\text{мол}}$ – число молекул в единице объема:

$$N_{\text{мол}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_{\text{мол}}}{M_{\text{мол}}}, \text{ молекул/см}^3,$$

где $\rho_{\text{мол}}$ и $M_{\text{мол}}$ – плотность и молекулярная масса соединения.

Для сплавов концентрация i -го элемента, процентное содержание которого C_i :

$$N_i = \frac{C_i}{100} \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_i}{A_i}, \text{ ядер/см}^3.$$

Расчет концентраций компонентов активной зоны:

$$N_{Fe} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_{\text{стали}} \cdot C_{Fe}}{A_{Fe} \cdot 100\%} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95 \cdot 70,7}{55,331 \cdot 100} = 6,115 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{Cr} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_{\text{стали}} \cdot C_{Cr}}{A_{Cr} \cdot 100\%} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95 \cdot 18}{55,331 \cdot 100} = 1,557 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{Ni} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_{\text{стали}} \cdot C_{Ni}}{A_{Ni} \cdot 100\%} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95 \cdot 9}{55,331 \cdot 100} = 7,785 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{Ti} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_{\text{стали}} \cdot C_{Ti}}{A_{Ti} \cdot 100\%} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95 \cdot 0,8}{55,331 \cdot 100} = 6,920 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{Mn} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_{\text{стали}} \cdot C_{Mn}}{A_{Mn} \cdot 100\%} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,95 \cdot 70,7}{55,331 \cdot 100} = 1,297 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_C = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_C}{A_C} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,7}{12,0107} = 8,521 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{Pb} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_{Pb}}{A_{Pb}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,522}{207,2} = 3,058 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{UN} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \rho_{UN}}{A_{UN}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 14,32}{251,9467} = 3,422 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_N = N_{UN} = 3,422 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_U = N_{UN} = 3,422 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{U^5} = \frac{N_U \cdot C_{U^5}}{100\%} = \frac{3,422 \cdot 10^{22} \cdot 2}{100} = 6,843 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{U^8} = \frac{N_U \cdot (100 - C_{U^5})}{100\%} = \frac{3,422 \cdot 10^{22} \cdot (100 - 2)}{100} = 3,353 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3,$$

где N_i – концентрация i -ого элемента, ядер/см³;

C_i – доля i -ого элемента, %;

ρ_i – удельный вес i -ого элемента, г/см³.

В таблице 3 приведены плотности материалов, а также рассчитанные концентрации для каждого элемента ячейки реактора.

Таблица 3 – Концентрации элементов

Материал	Плотность (ρ), г/см ³	Элемент (и его доля)	Атомный вес (А)	Концентрация (N), 10 ²⁰ ядер/см ³
Замедлитель (C)	1,700	C ¹²	12,011	852,100
Теплоноситель (Pb)	10,522	Pb ²⁰⁷	207,200	305,800
Топливо (UN)	14,320	N ¹⁴	14,007	342,193
		U ²³⁵ (2%)	235	6,843
		U ²³⁸ (98%)	238	335,320
Конструкционный элемент, оболочки твэлов — нержавеющая сталь 1X18H9T	7,950	Fe ⁵⁶ (70,7%)	55,845	611,524
		Cr ⁵² (18,0%)	51,996	155,692
		Ni ⁵⁹ (9,0%)	58,693	77,846
		Ti ⁴⁹ (0,8%)	47,867	6,920
		Mn ⁵⁵ (1,5%)	54,938	12,974

1.2.2.2 Микроскопические сечения

В реальных средах необходимо обработать значения сечений, так как распределение тепловых нейтронов не совпадает в точности с распределением Максвелла, поскольку имеет место поглощение тепловых нейтронов. Таким образом, 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 (T_{н.г.} – температура нейтронного газа), которая превышает температуру замедлителя.

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

$$\overline{\sigma}_a = \sigma_{a0} \cdot 0,886 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}},$$

$$\overline{\sigma}_f = \sigma_{f0} \cdot 0,886 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}},$$

где σ_{a0}, σ_{f0} – табличные значения сечений;

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

В тепловых реакторах температура нейтронного газа превышает температуру среды на 50 – 100 °С. При расчете холодного реактора можно принимать $T_{н.г.} = 350 - 400$ К.

Для микроскопических сечений рассеяния (σ_s) воспользоваться табличными значениями.

Транспортное микроскопическое сечения ядра характеризуют анизотропию свойств среды и определяется выражением:

$$\sigma_{tr} = \overline{\sigma_a} + \sigma_s \cdot (1 - \overline{\mu}),$$

где $\overline{\mu} = \frac{2}{3A}$ – средний косинус угла рассеяния (A – массовое число нуклида).

Примем $T_{н.г.} = 350$ К. Тогда значение функции отклонения от закона $\frac{1}{v^2}$ для U^{235} : $f = 0,96$ (для неделящихся нуклидов $f = 1$). Табличные значения сечений, а также пересчитанные на температуру нейтронного газа сечения поглощения и деления для всех элементов, входящих в состав ячейки сведены в таблице 4. Все значения сечений – в барнах. При дальнейших расчетах подставляются пересчитанные сечения поглощения и деления.

Таблица 4 – Микроскопические сечения

Нуклид	σ_{a0}	σ_{f0}	$\overline{\sigma_a}$	$\overline{\sigma_f}$	σ_s	$\overline{\mu}$	σ_{tr}
C ¹²	0,004	-	$3,235 \cdot 10^{-3}$	-	4,700	0,056	4,440
Pb ²⁰⁷	0,170	-	0,137	-	11,330	0,003	11,431
N ¹⁴	1,850	-	1,500	-	9,800	0,048	10,829
U ²³⁵	683	582	531,527	453,705	15	0,003	546,482
U ²³⁸	2,710	-	2,197	-	9	0,003	11,170
Fe ⁵⁶	2,530	-	2,046	-	11,400	0,012	13,310
Cr ⁵²	3,100	-	2,507	-	4,200	0,013	6,653
Ni ⁵⁹	4,600	-	3,721	-	17	0,011	20,534
Ti ⁴⁹	5,800	-	4,691	-	4,200	0,014	8,832
Mn ⁵⁵	13,160	-	10,644	-	2,300	0,012	12,916

1.2.2.3 Макроскопические сечения

Макроскопические поперечные сечения вычисляются следующим образом:

$$\Sigma_i = \sigma_i \cdot N_i.$$

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

$$\Sigma = \sum_{i=1}^m N_{i\text{гом}} \cdot \sigma_i = \frac{1}{S_{\text{яч}}} \sum_{i=1}^m S_i \cdot N_i \cdot \sigma_i.$$

Замедляющая способность вычисляется по следующему правилу:

$$\xi \Sigma_s = \sum_{i=1}^m \xi_i \cdot N_i \cdot \sigma_{si},$$
$$\xi_i = \frac{2}{A_i + \frac{2}{3}},$$

где A_i – массовое число нуклида.

Тогда величина среднего логарифмического декремента для смеси веществ, сплава и т.д.:

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^m \xi_i \cdot N_i \cdot \sigma_{si}}{\sum_{i=1}^m N_i \cdot \sigma_{si}}.$$

Из правила вычисления макроскопических сечений видно, что для дальнейшего расчета необходимо определить площади составляющих ячейки – замедлителя, топлива, теплоносителя и пр.

Ячейку можно рассматривать в виде так называемого «фиктивного блока» (труба технологического канала со всем содержимым), окруженного замедлителем:

$$S_{\phi} = \pi \cdot (R_{TK} + \Delta_{TK})^2 = 3,14 \cdot (5 + 0,2)^2 = 84,9 \text{ см}^2,$$

$$S_{\text{зам}} = S_{\text{яч}} - S_{\phi} = 625 - 84,9 = 540,1 \text{ см}^2,$$

где $R_{TK} = 5 \text{ см}$ – внутренний радиус трубы технологического канала;

$\Delta_{TK} = 0,2$ см – толщина ее стенки.

Площадь, занимаемая материалом трубы ТК, есть площадь соответствующего кольца:

$$S_{обТК} = S_{\phi} - \pi \cdot R_{TK}^2 = 84,9 - 3,14 \cdot 5^2 = 6,4 \text{ см}^2.$$

Площади тепловыделяющих элементов и их составных частей могут быть посчитаны следующим образом:

$$S_{UN} = n \cdot \frac{\pi \cdot d_{UN}^2}{4} = 18 \cdot \frac{3,14 \cdot 1,78^2}{4} = 44,77 \text{ см}^2,$$

$$S_{ззз} = \frac{\pi \cdot n}{4} [(d_{UN} + 2\delta_{ззз})^2 - d_{UN}^2] = \frac{3,14 \cdot 18}{4} [(1,78 + 2 \cdot 0,02)^2 - 1,78^2] = 2,6 \text{ см}^2,$$

$$S_{об} = \frac{\pi \cdot n}{4} [(d_{UN} + 2\delta_{ззз} + 2\Delta_{об})^2 - (d_{UN} + 2\delta_{ззз})^2] =$$

$$\frac{3,14 \cdot 18}{4} [(1,78 + 2 \cdot 0,02 + 2 \cdot 0,09)^2 - (1,78 + 2 \cdot 0,02)^2] = 9,72 \text{ см}^2,$$

$$S_{твэл} = n \cdot \frac{\pi \cdot d_{твэл}^2}{4} = 18 \cdot \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 56,52 \text{ см}^2,$$

где S_{UN} – суммарная площадь топлива в ячейке;

$S_{ззз}$ – площадь гелиевой прослойки всех твэлов ячейки;

$S_{об}$ – площадь всех стальных оболочек твэлов ячейки;

$S_{твэл}$ – площадь всех твэлов;

$n = 18$ – число твэлов;

$d_{UN} = 1,78$ см – диаметр топливной таблетки;

$\delta_{ззз} = 0,02$ см – толщина прослойки;

$\Delta_{об} = 0,09$ см – толщина оболочки твэл;

$d_{твэл} = d_{UN} + 2\delta_{ззз} + 2\Delta_{об} = 2$ см – диаметр твэла.

Для теплоносителя:

$$S_{TH} = S_{\phi} - S_{обТК} - S_{твэл} = 84,9 - 6,4 - 56,52 = 21,98 \text{ см}^2.$$

Воспользуемся долей компонента в общем сечении ячейки:

$$\beta_i = \frac{S_i}{S_{яч}}.$$

Расчет долей компонентов в общем сечении ячейки:

$$\beta_C = \beta_{зам} = \frac{S_{зам}}{S_{яч}} = \frac{540,1}{625} = 0,864,$$

$$\beta_{Pb} = \beta_{TH} = \frac{S_{TH}}{S_{яч}} = \frac{21,98}{625} = 0,035,$$

$$\beta_{UN} = \beta_{мон} = \frac{S_{UN}}{S_{яч}} = \frac{44,77}{625} = 0,072,$$

$$\beta_{сталь} = \beta_{KM} = \frac{S_{обTK} + S_{обтвэл}}{S_{яч}} = \frac{6,4 + 9,72}{625} = 0,026,$$

$$\beta_{зазор} = \frac{S_{заз}}{S_{яч}} = \frac{2,6}{625} = 0,004.$$

Проверка правильности расчётов:

$$\sum \beta_i = \beta_C + \beta_{Pb} + \beta_{UN} + \beta_{сталь} + \beta_{зазор} = 1.$$

В таблицу 5 сведены все рассчитанные макроскопические сечения и замедляющие способности, а также доли от общей площади всех компонент выбранной ячейки.

Таблица 5 – Макроскопические сечения

Материал, нуклид	β	ξ	$\xi\Sigma_s, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_a, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{ см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{ см}^{-1}$
Замедлитель (C ¹²)	0,864	0,158	0,063	-	$2,760 \cdot 10^{-4}$	0,400	0,378
Теплоноситель (Pb ²⁰⁷)	0,035	0,010	0,003	-	$4,203 \cdot 10^{-3}$	0,346	0,349
Топливо (UN)	0,072	0,153	0,048	0,310	0,489	0,647	1,119
N ¹⁴	-	0,136	0,046	-	0,051	0,335	0,371
U ²³⁵	-	0,009	$8,7 \cdot 10^{-5}$	0,310	0,364	0,010	0,374
U ²³⁸	-	0,008	0,003	-	0,074	0,302	0,375
Оболочка	0,026	0,184	0,032	-	0,210	0,901	1,100
Fe ⁵⁶	-	0,035	0,024	-	0,125	0,697	0,814
Cr ⁵²	-	0,038	0,003	-	0,039	0,065	0,104
Ni ⁵⁹	-	0,034	0,004	-	0,029	0,132	0,160
Ti ⁴⁹	-	0,041	$1,2 \cdot 10^{-4}$	-	0,003	0,003	0,006
Mn ⁵⁵	-	0,036	$1,1 \cdot 10^{-4}$	-	0,014	0,003	0,017
Зазор (прослойка)	0,003	-	-	-	-	-	-

1.3 Расчет коэффициента размножения бесконечной среды

Коэффициент размножения бесконечной среды является важной характеристикой активной зоны реактора, так как по его величине можно судить о целесообразности продолжения расчета того или иного варианта.

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется формулой четырех сомножителей:

$$k_{\infty} = \eta \varepsilon \varphi \theta,$$

где η – коэффициент размножения на тепловых нейтронах в горючем;

ε – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;

φ – вероятность избежать резонансного захвата;

θ – коэффициент использования тепловых нейтронов.

1.3.1 Расчет выхода нейтронов на один акт поглощения теплового в горючем

Если топливо применяется в виде сплава или химического соединения, то коэффициент размножения на тепловых нейтронах пропорционален отношению макроскопических сечений деления и поглощения в топливе:

$$\eta = \nu_f \frac{\Sigma_{fmon}}{\Sigma_{amon}},$$

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

Для U^{235} : $\nu_f = 2,42$.

$$\eta = 2,42 \frac{0,310}{0,489} = 1,537.$$

1.3.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах

Величина ε в гетерогенном реакторе зависит от формы, размеров и расположения топливного блока, а также от диффузионных свойств топливного блока.

При расчете ε для стержневых и трубчатых ТВЭЛов можно воспользоваться формулой:

$$\varepsilon = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \cdot \varepsilon_1,$$

$$\varepsilon_1 = \frac{N_8}{N_{08}},$$

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);

ε_1 – пористость блока по U^{238} ;

N_{08} – число ядер U^{238} в 1 см^3 естественного урана;

N_8 – число ядер U^{238} в 1 см^3 блока.

Если $C_{05} = 0,72\%$ – содержание U^{235} в естественном уране, а $\rho_{0u} = 19,08 \text{ г/см}^3$ – плотность естественного урана, то:

$$N_{08} = \left(1 - \frac{C_{U^{235}}^{\text{прир}}}{100\%}\right) \cdot N_A \cdot \frac{\rho_{0u}^{\text{прир}}}{A_{U^{238}}} = \left(1 - \frac{0,72}{100}\right) \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot \frac{19,08}{238} = 4,794 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

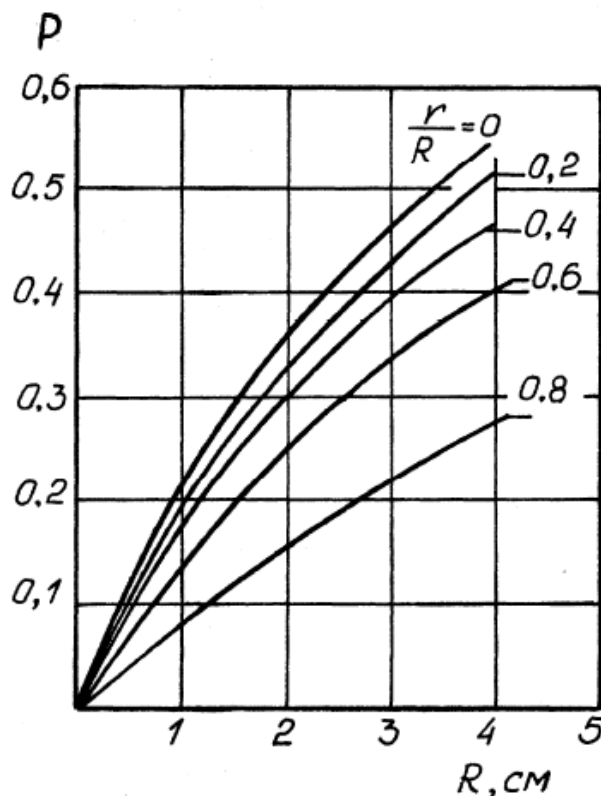


Рисунок 1 – Зависимость вероятности испытать нейтроном столкновения с ядром U^{238} от радиуса блока

Из графика, для $R = 1 \text{ см}$, определяем, что P примерно равно 0,23.

$$\varepsilon = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,23}{1 - 0,52 \cdot 0,23} \cdot 0,699 = 1,017.$$

1.3.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов

Реальная ячейка заменяется эквивалентной ячейкой с одним фиктивным цилиндрическим блоком. Фиктивный блок образуется путем гомогенизации всего содержимого рабочего канала.

Коэффициент использования тепловых нейтронов в данном случае можно посчитать по формуле

$$\theta = \theta'_\phi \cdot \theta_0,$$

где θ'_ϕ – отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных в ячейке нейтронов;

θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_a^{mon} \cdot S_{mon}}{\Sigma_a^\phi \cdot S_\phi},$$

где S_ϕ – площадь фиктивного блока;

Σ_a^ϕ – макроскопическое сечение поглощения фиктивного блока представляет собой усреднение макросечений всех входящих компонентов:

$$\Sigma_a^\phi = \frac{1}{S_\phi} \sum_{i=1}^m \Sigma_a^i \cdot S_i.$$

Подставив данные таблицы 5, получим:

$$\begin{aligned} \Sigma_a^\phi &= \frac{1}{S_\phi} \sum_{i=1}^m \Sigma_a^i \cdot S_i = \frac{\Sigma_a^{стали} \cdot S_{стали} + \Sigma_a^{UN} \cdot S_{UN} + \Sigma_a^{Pb} \cdot S_{Pb}}{84,94867} = \\ &= \frac{0,210 \cdot (9,720716 + 6,408849) + 0,488 \cdot 44,7922 + 0,004 \cdot 21,99115}{84,94867} = 0,299 \text{ см}^{-1}, \\ \theta_0 &= \frac{44,79 \cdot 0,488}{0,299 \cdot 84,95} = 0,863. \end{aligned}$$

Расчет величины θ'_ϕ ведется по соотношению:

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

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования:

$$F = \frac{\overline{\Phi_{зам}}}{\Phi_{\phi}} = \frac{1}{2} \frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} \frac{I_0(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}})}{I_1(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}})},$$

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

$R_{\phi} = R_{TK} + \Delta_{обTK} = 5,2$ см – радиус фиктивного блока;

L_{ϕ} – длина диффузии фиктивного блока, определяемая по классическому правилу:

$$L_{\phi}^2 = \frac{1}{3\Sigma_{a\phi}\Sigma_{tr\phi}},$$

причем транспортное макроскопическое сечение считается аналогично:

$$\Sigma_{tr}^{\phi} = \frac{1}{S_{\phi}} \sum_{i=1}^m \Sigma_{tr}^i \cdot S_i.$$

Таким образом:

$$\Sigma_{tr}^{\phi} = \frac{1}{S_{\phi}} \sum_{i=1}^m \Sigma_{tr}^i \cdot S_i = \frac{\Sigma_{tr}^{стали} \cdot S_{стали} + \Sigma_{tr}^{UN} \cdot S_{UN} + \Sigma_{tr}^{Pb} \cdot S_{Pb}}{84,94867} =$$

$$\frac{1,100 \cdot 16,13 + 1,119 \cdot 44,79 + 0,349 \cdot 21,99}{84,94867} = 0,889 \text{ см}^{-1},$$

$$L_{\phi}^2 = \frac{1}{3\Sigma_{a\phi}\Sigma_{tr\phi}} = \frac{1}{3 \cdot 0,299 \cdot 0,889} = 1,254 \text{ см}^2,$$

$$L_{\phi} = \sqrt{1,254} = 1,120 \text{ см},$$

$$F = \frac{\overline{\Phi_{зам}}}{\Phi_{\phi}} = \frac{1}{2} \frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} \frac{I_0(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}})}{I_1(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}})} = \frac{5,2}{1,120} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{19,819}{17,528} = 2,625.$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

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

где $R_{зам} = \sqrt{\frac{S_{яч}}{3,14}} = \sqrt{\frac{625}{3,14}} = 14,105$ см – радиус эквивалентной ячейки (из условия равенства площадей);

$L_{зам}$ – длина диффузии в замедлителе (графите), вычисляемая аналогично:

$$L_{зам} = \frac{1}{\sqrt{3\Sigma_a^C \cdot \Sigma_{tr}^C}} = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot 0,000276 \cdot 0,378}} = 56,53 \text{ см.}$$

Тогда:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{14,105}{56,53}\right)^2 \cdot \left(\ln \frac{14,105}{5,2} - 0,75\right) = 0,007714,$$

$$\frac{1}{\theta'_\phi} = 1 + 2,625 \cdot \frac{540,1 \cdot 0,000276}{84,9 \cdot 0,298691} + 0,007714 = 1,023,$$

$$\theta'_\phi = \frac{1}{1,023} = 0,977.$$

Окончательно:

$$\theta = \theta'_\phi \cdot \theta_0 = 0,977 \cdot 0,863 = 0,843.$$

1.3.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата

В энергетических реакторах, как правило, применяются сборки тепловыделяющих элементов, которые состоят из нескольких блоков ядерного топлива. Для ячейки со стержневыми блоками:

$$\varphi = e^{-\frac{(k_T \cdot R_{UN} \cdot \sqrt{R_{II} \cdot n \cdot \varepsilon_1}) + 0,73 \cdot n \cdot R_{UN}^2 \cdot \varepsilon_1}{\xi \Sigma_s^{зам} \cdot S_{зам} + \xi \Sigma_s^\phi \cdot S_\phi}},$$

где $\xi \Sigma_s^{зам}$ и $\xi \Sigma_s^\phi$ – замедляющая способность замедлителя и фиктивного блока соответственно;

$S_{зам}$ и S_ϕ – площадь замедлителя и фиктивного блока;

$R_{UN} = 0,89$ см – радиус уранового блока;

$n = 18$ – число ТВЭЛов в пучке;

ε_1 – пористость блока;

$R_{II} = 4,243$ см – радиус пучка ТВЭЛов;

k_T – температурный коэффициент ($T_U = 400$ К – средняя температура урана в «холодном» реакторе):

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 0,00175 \cdot \sqrt{T_U}) = 0,775 \cdot (1 + 0,00175 \cdot \sqrt{400}) = 1,046.$$

Тогда

$$\varphi = e^{\frac{(1,046 \cdot 0,89 \cdot \sqrt{4,243 \cdot 18 \cdot 0,699}) + 0,73 \cdot 18 \cdot 0,89^2 \cdot 0,699}{0,0632 \cdot 540,1 + 0,1842 \cdot 0,6 \cdot 84,9}} = 0,724.$$

В конечном итоге получено расчетное значение коэффициента размножения:

$$k_{\infty} = 0,724 \cdot 0,843 \cdot 1,017 \cdot 1,537 = 0,954.$$

1.4 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения реактора вычисляется по формуле:

$$k_{\text{эф}} = \frac{k_{\infty} e^{-B^2 \tau_p}}{1 + B^2 L_p^2},$$

где k_{∞} – коэффициент размножения нейтронов бесконечной среды;

B^2 – геометрический параметр;

τ_p – возраст нейтронов в решетке;

L_p^2 – квадрат длины диффузии нейтронов в решетке.

1.4.1 Коэффициент диффузии и длина диффузии в решетке

По определению коэффициент диффузии и квадрат диффузии для гомогенных сред выражаются формулами:

$$L_p^2 = \frac{1}{3 \cdot \overline{\Sigma_{trp}} \cdot \overline{\Sigma_{ap}}},$$

где $\overline{\Sigma_{ap}}$ и $\overline{\Sigma_{trp}}$ – усредненные по ячейке макросечения.

Расчет квадрата длины диффузии для реактора, имеющего сложные каналы с большим числом твэл, производится по следующему соотношению:

$$L_p^2 = L_{\text{зам}}^2 \cdot \frac{1 + \frac{S_{\phi}}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{\overline{\Phi_{\phi}}}{\overline{\Phi_{\text{зам}}}}}{1 + \frac{S_{\phi}}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{\overline{\Sigma_{tr\phi}}}{\overline{\Sigma_{tr\text{зам}}}}} \cdot \frac{S_{\text{яч}}}{S_{\text{зам}}} \cdot (1 - \theta'_{\phi}),$$

где S_{ϕ} – площадь фиктивного канала, см²;
 $S_{зам}$ – площадь замедлителя, см²;
 $S_{яч}$ – площадь ячейки, см²;
 $\frac{\overline{\Phi_{\phi}}}{\overline{\Phi_{зам}}}$ – есть обратная величина коэффициента экранировки блока
горючего F;

$L_{зам}$ – длина диффузии в замедлителе, см;

$\overline{\Sigma_{tr\phi}}$ – транспортное макроскопическое сечение фиктивного блока, см⁻¹;

$\overline{\Sigma_{trзам}}$ – транспортное макроскопическое сечение замедлителя, см⁻¹;

θ'_{ϕ} – коэффициент использования тепловых нейтронов ячейки
фиктивным блоком.

Длина диффузии в замедлителе:

$$L_{зам}^2 = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{aC} \cdot \Sigma_{trC}} = \frac{1}{3 \cdot 0,000276 \cdot 0,378} = 3196,1422 \text{ см}^2,$$

$$L_{зам} = \sqrt{3196,1422} = 56,53 \text{ см.}$$

Транспортное макроскопическое сечение фиктивного блока:

$$\overline{\Sigma_{tr\phi}} = \frac{\Sigma_{trмон} \cdot S_{мон} + \Sigma_{trTH} \cdot S_{TH} + \Sigma_{trсталь} \cdot S_{сталь}}{S_{\phi}} =$$

$$\frac{1,119 \cdot 44,79 + 0,349 \cdot 21,99 + 1,100 \cdot (9,72 + 6,41)}{84,9} = 0,889 \text{ см}^{-1}.$$

Подставляем численные значения всех величин и получим значение:

$$L_p^2 = L_{зам}^2 \cdot \frac{1 + \frac{S_{\phi}}{S_{зам}} \cdot \frac{\overline{\Phi_{\phi}}}{\overline{\Phi_{зам}}}}{1 + \frac{S_{\phi}}{S_{зам}} \cdot \frac{\overline{\Sigma_{tr\phi}}}{\overline{\Sigma_{trзам}}}} \cdot \frac{S_{яч}}{S_{зам}} \cdot (1 - \theta'_{\phi}) = 3196,1422 \cdot \frac{1 + \frac{84,9}{540,1} \cdot \frac{1}{2,624}}{1 + \frac{84,9}{540,1} \cdot \frac{0,889}{0,378}} \cdot \frac{625}{540,1} \cdot (1 - 0,977) = 64,66 \text{ см}^2.$$

1.4.2 Возраст нейтронов в решетке

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

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

где $\tau_{зам} = 352,03 \text{ см}^2$ – возраст нейтронов в замедлителе (графите).

Таким образом возраст нейтронов в решетке:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^2 = 352,03 \cdot \left(\frac{625}{540,1} \right)^2 = 471,4 \text{ см}^2.$$

1.4.3 Геометрический параметр

Для реактора с отражателем в случае применения формулы $k_{эф} = \frac{k_{\infty} e^{-B^2 \tau_p}}{1 + B^2 L_p^2}$,

необходимо учитывать эффективные добавки за счет отражателя (δ). Так, для цилиндрического реактора

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H_э} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R_э} \right)^2,$$

где $H_э = H_{a.э.} + 2\delta$, $R_э = R_{a.э.} + \delta$ – экстраполированные размеры реактора, см;

δ – эффективная добавка за счет отражателя, см.

Для уран-графитовых реакторов с графитовым отражателем эффективная добавка вычисляется по следующей формуле:

$$\delta = 1,2 L_{отр} \tanh \frac{T}{L_{отр}},$$

где $L_{отр} = L_{зам}$ – длина диффузии в отражателе (замедлителе), см;

T – толщина отражателя, см.

В свою очередь толщина отражателя вычисляется:

$$T = 1,5 M_{отр}.$$

где $M_{отр}$ – длина миграции в отражателе, см:

$$M_{отр} = \sqrt{L_{зам}^2 + \tau_{зам}} = \sqrt{3196,1422 + 352,03} = 59,567 \text{ см}.$$

Подставим численные величины и рассчитаем искомые значения:

$$T = 1,5 M_{отр} = 1,5 \cdot 59,567 = 89,35 \text{ см},$$

$$\delta = 1,2 L_{отр} \tanh \frac{T}{L_{отр}} = 1,2 \cdot 56,53 \cdot \tanh \frac{89,35}{56,53} = 1,2 \cdot 56,53 \cdot 0,9187 = 62,324 \text{ см},$$

$$H_э = H_{a.э.} + 2\delta = 646,25392 + 2 \cdot 62,324 = 770,902 \text{ см},$$

$$R_j = R_{a.з.} + \delta = \frac{807,8174}{2} + 62,324 = 466,233 \text{ см.}$$

Подставив рассчитанные величины в исходную формулу геометрического параметра и получим его значение:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H_j}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R_j}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{770,902}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{466,233}\right)^2 = 4,322 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}.$$

Окончательно эффективный коэффициент размножения «холодного» реактора

$$k_{эф} = \frac{k_{\infty} e^{-B^2 \tau_p}}{1 + B^2 L_p^2} = \frac{0,954 \cdot e^{-4,322 \cdot 10^{-5} \cdot 471,5}}{1 + 4,322 \cdot 10^{-5} \cdot 64,66} = 0,932.$$

1.4.4 Оптимизация параметров ячейки

Оптимизация параметров ячейки производится для нахождения наибольшего эффективного коэффициента размножения, производится в 3 этапа.

На первом этапе изменяется шаг решётки от которого зависит размер ячейки под ключ при постоянном диаметре твэла. Полученные данные приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Изменение размера под ключ

Параметр	Значение									
Размер ячейки	25	30	40	41	42	43	44	45	46	47
Внешний диаметр твэла	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Диаметр топл. таблетки	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78
Скорость ТН	3,268	4,706	8,367	8,79	9,244	9,669	10,12	10,59	11,07	11,55
К беск.	0,954	1,027	1,072	1,072	1,071	1,069	1,067	1,064	1,060	1,057
К эфф.	0,932	1,003	1,041	1,040	1,039	1,036	1,033	1,030	1,025	1,021

На втором этапе изменяется радиус технологического канала при постоянном диаметре твэлов и размере ячейки под ключ. Полученные данные приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Изменение радиуса технологического канала

Параметр	Значение						
Размер ячейки	40	40	40	40	40	40	40
Внешний диаметр твэла	2	2	2	2	2	2	2
Радиус ТК	4,4	5	6	7	8	9	10
Скорость ТН	43,06	8,366	3,254	1,889	1,273	0,930	0,714
К беск.	1,069	1,072	1,073	1,071	1,069	1,059	1,050
К эфф.	1,037	1,041	1,044	1,056	1,037	1,030	1,021

На третьем этапе оптимизации при оптимальном значении размера ячейки под ключ изменяется внешний диаметр твэла, изменяя тем самым и диаметр топливной таблетки. Данные полученные в этом шаге оптимизации приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Изменение внешнего диаметра твэла

Параметр	Значение					
Размер ячейки	40	40	40	40	40	40
Внешний радиус твэла	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
Радиус топливной таблетки	0,59	0,69	0,79	0,89	0,99	1,09
Скорость теплоносителя	2,55	2,392	2,734	3,254	4,119	5,81
К бесконечное	0,987	1,035	1,062	1,073	1,074	1,066
К эффективное	0,958	1,006	1,032	1,044	1,045	1,037

Оптимальными параметрами принимаются параметры, при которых эффективный коэффициент размножения будет максимальным и приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Оптимальные параметры ячейки

Размер ячейки под ключ, см	40
Внешний радиус твэла, см	1
Радиус топливной таблетки, см	0,89
v , м/с	3,254
Радиус технологического канала, см	6
k_{∞}	1,073

Продолжение таблицы 9

$k_{эф}$	1,044
----------	-------

На рисунках 2 – 4 указаны зависимости эффективного коэффициента размножения от изменяемых параметров, таких как размер под ключ, радиус топливного канала и радиус твэла. При этом другие параметры являются оптимизированными и не изменяются.

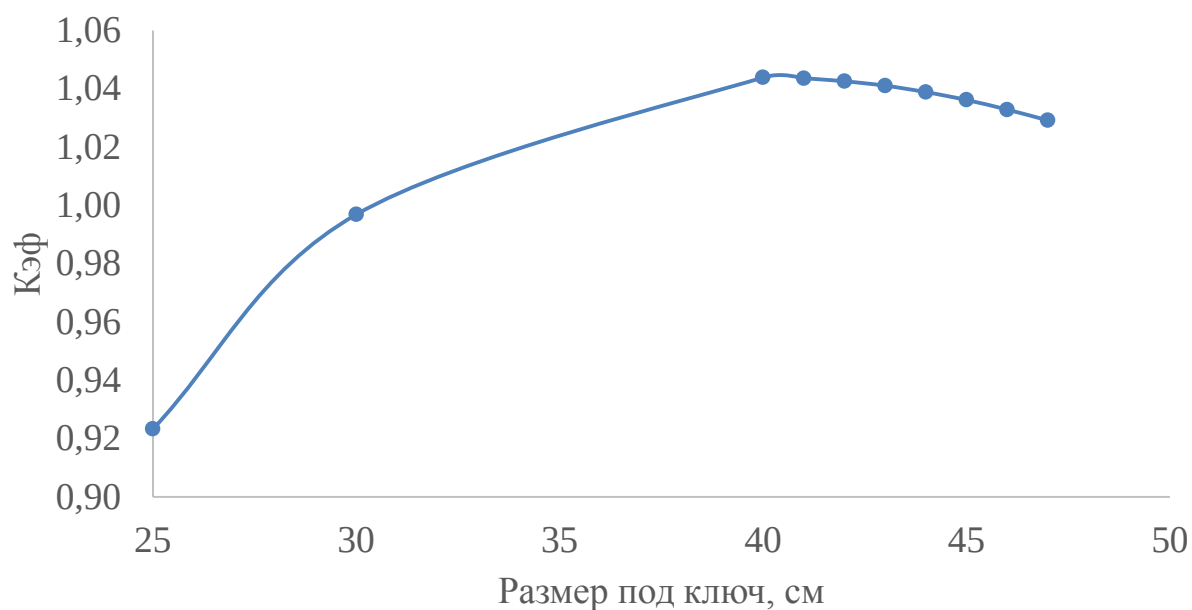


Рисунок 2 – зависимость эффективного коэффициента размножения от размера под ключ

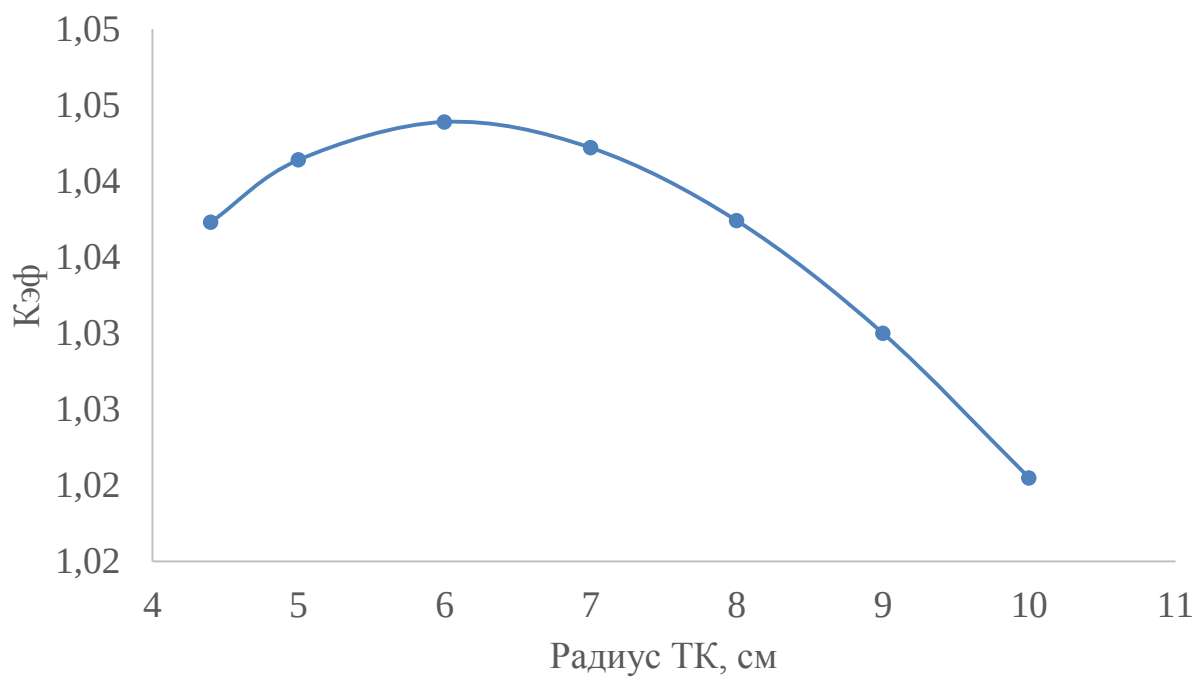


Рисунок 3 – зависимость эффективного коэффициента размножения от радиуса топливного канала

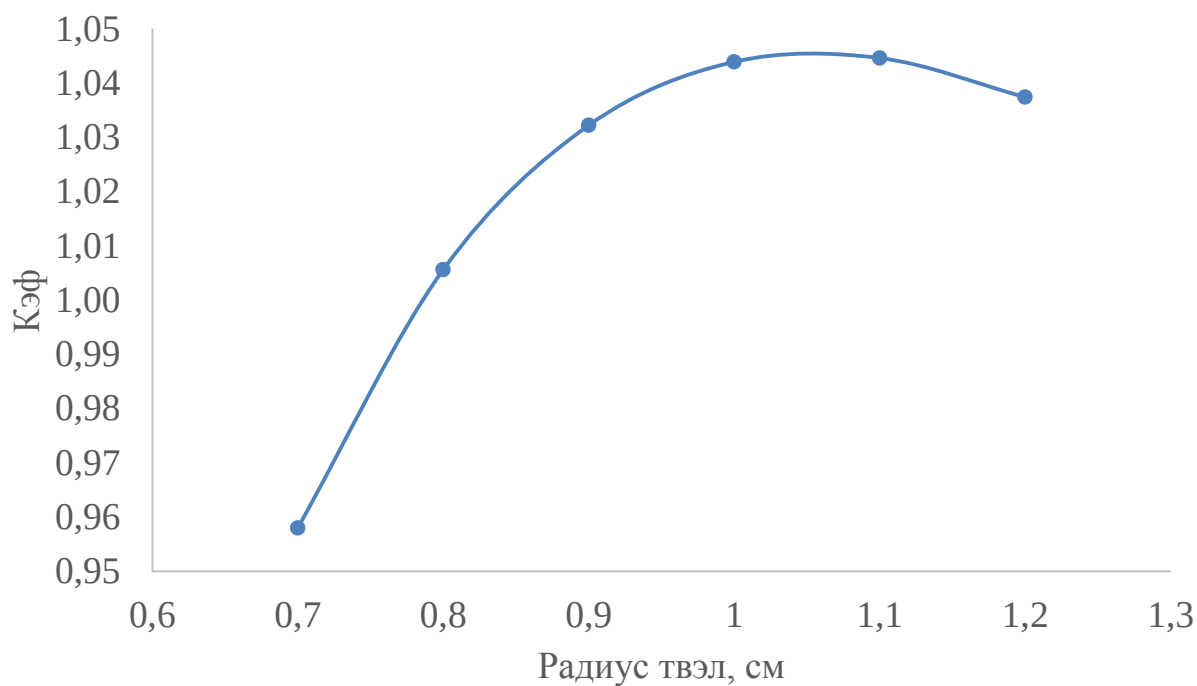


Рисунок 4 – зависимость эффективного коэффициента размножения от радиуса твэла

1.5 Нейтронно-физические параметры критического стационарного «горячего» реактора

1.5.1 Температурные эффекты реактивности

При работе реактора происходит существенное повышение температуры всех материалов активной зоны, отражателя и корпуса реактора.

При повышении температуры повышается температура нейтронного газа, что приводит к уменьшению сечений поглощения и деления тепловых нейтронов. Повышение температуры приводит к уменьшению плотности материалов вследствие расширения, что ведет к уменьшению числа ядер в единице объема и, следовательно, к уменьшению макросечений. Повышение $T_{н.г.}$ вызывает смещение энергии «сшивки» спектров тепловых и замедляющихся нейтронов в область больших энергий. Сдвиг энергии «сшивки» приводит к уменьшению возраста тепловых нейтронов.

Повышение температуры ядерного горючего приводит к уширению резонансов горючего вследствие их теплового движения.

Все это приводит к изменению реактивности реактора.

1.5.1.1 Зависимость поперечных сечений от температуры

Чтобы определить температурные эффекты реактивности, нужно знать температуру нейтронного газа при рабочей температуре и соответствующие ей новые значения сечений и других параметров реактора.

При расчете можно принимать, что средняя температура замедлителя равна средней температуре теплоносителя. Эффективная температура нейтронного газа вычисляется по формуле:

$$T_{н.г.} = T_{зам} \left(1 + 1,4 \frac{\Sigma_{аяч}}{\xi \Sigma_{сяч}} \right), \text{ К},$$

$$\text{где } T_{зам} = \frac{T_{ТНвх} + T_{ТНвх}}{2} = \frac{753 + 603}{2} = 678 \text{ К}.$$

Сечения $\Sigma_{аяч}$ и $\xi \Sigma_{сяч}$ берутся при температуре замедлителя. Вычислим отношение $\Sigma_{аяч}$ и $\xi \Sigma_{сяч}$.

Замедляющая способность определяется простым усреднением, однако, при расчете макросечения поглощения ячейки необходимо учитывать блок эффект.

$$\xi \Sigma_{сяч} = \frac{\xi \Sigma_{s3ам} \cdot S_{3ам} + \xi \Sigma_{sмон} \cdot S_{мон} + \xi \Sigma_{sTH} \cdot S_{TH} + \xi \Sigma_{sKM} \cdot S_{KM}}{S_{яч}} =$$

$$\frac{0,06318 \cdot 1479,24 + 0,04832 \cdot 44,79 + 0,00333 \cdot 56,55 + 0,03184 \cdot 17,39}{1600} = 0,060227 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_{аяч} = \frac{\Sigma_{а3ам} \cdot S_{3ам} + \frac{1}{F} (\Sigma_{амон} \cdot S_{мон} + \Sigma_{аTH} \cdot S_{TH} + \Sigma_{аKM} \cdot S_{KM})}{S_{3ам} + \frac{1}{F} (S_{мон} + S_{TH} + S_{KM})} =$$

$$\frac{1479,24 \cdot 0,00003 + \frac{1}{1,195} (44,79 \cdot 0,06024 + 56,55 \cdot 0,00050 + 17,39 \cdot 0,02519)}{1479,24 + \frac{1}{1,195} (44,79 + 56,55 + 17,39)} = 0,001709 \text{ см}^{-1},$$

$$\frac{\Sigma_{аяч}}{\xi \Sigma_{сяч}} = \frac{0,001709}{0,060227} = 0,028376278.$$

Отсюда следует, что температура нейтронного газа при рабочей температуре равна:

$$T_{н.г.} = 678 \cdot (1 + 1,4 \cdot 0,028376278) = 704,93 \text{ К.}$$

Сечения при температуре нейтронного газа определяются следующим образом:

$$\overline{\sigma}_a(T_{н.г.}) = \sigma_{a0} \cdot 0,886 \cdot f_a(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{zp}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}},$$

где σ_{a0} – микроскопическое сечение поглощения стандартных нейтронов;
 $f_a(T_{н.г.})$ – поправочных коэффициент, который характеризует отклонение сечения от закона $1/v$;

$$F(\chi_{zp}) = \frac{\chi_{zp}^2 \cdot e^{-\chi_{zp}}}{1 - (1 + \chi_{zp}) \cdot e^{-\chi_{zp}}} = \frac{\Sigma_a(E_{zp}, E_T)}{\xi \Sigma_s}, \text{ где } \chi_{zp} \text{ – верхняя граница тепловой}$$

группы;

χ_{zp} – определяется из вышеназванного уравнения подбором.

Подбор был осуществлен с помощью MS Excel и полученное значение χ_{zp} приблизительно равно 7,66.

Коэффициенты $f_a(T_{н.з.}), F(\chi_{zp})$ находятся по значению χ_{zp} из графиков на рисунке 5.

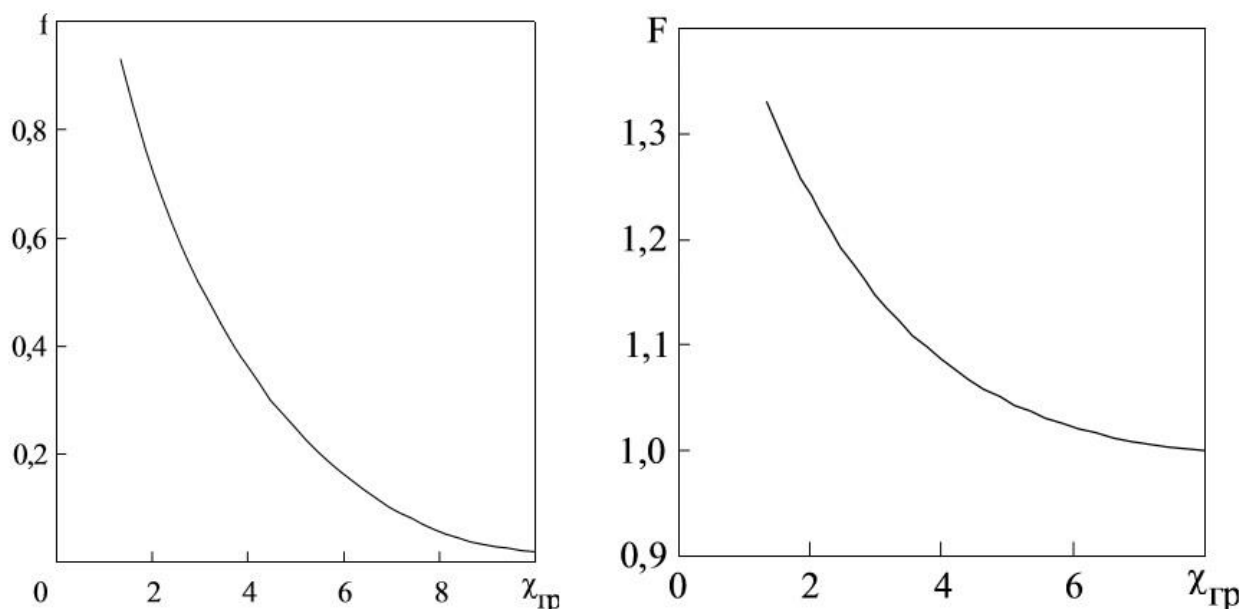


Рисунок 5 – зависимость коэффициентов $f_a(T_{н.з.}), F(\chi_{zp})$ от χ_{zp}

Примем значения $f_a(T_{н.з.})=0,08$, а $F(\chi_{zp})=1$. Тогда формула для пересчета сечений примет следующий вид:

$$\overline{\sigma}_a(T_{н.з.}) = \sigma_{a0} \cdot 0,886 \cdot 0,08 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.з.}}}.$$

Сечения деления пересчитываются аналогичным образом. Значения микроскопических и макроскопических сечений при рабочей температуре приведены в таблице 10

Таблица 10 – микроскопические и макроскопические сечения поглощения и деления при рабочей температуре

Материал	Микроскопическое сечение		Макроскопическое сечение	
	σ_a	σ_f	Σ_a	Σ_f
UN	-	-	0,028403	0,017502
U^{235}	31,21072	25,57542	0,021358	0,017502
U^{238}	0,123838	0	0,004152	0
N	0,084539	0	0,002893	0

Продолжение таблицы 10

Материал	Микроскопическое сечение		Макроскопическое сечение	
	σ_a	σ_f	Σ_a	Σ_f
Pb ²⁰⁷	0,007768	0	0,000237	0
C ¹²	0,000183	0	0,000016	0
Сталь 1X18H9T	1,333881	-	0,011875	0
Fe ⁵⁶	0,115612	0	0,007070	0
Cr ⁵²	0,141659	0	0,002206	0
Ni ⁵⁹	0,210204	0	0,001636	0
Ti ⁴⁸	0,265040	0	0,000183	0
Mn ⁵⁵	0,601366	0	0,000780	0

1.5.1.2 Расчет эффективного коэффициента размножения «горячего» реактора

Эффективный коэффициент размножения для горячего реактора вычисляется следующим образом:

$$k_{эф}^{гор} = \frac{k_{\infty}^{гор} \cdot e^{-B^2 \tau^{гор}}}{1 + B^2 \cdot L_{гор}^2}.$$

Для расчета $\tau^{гор}$ можно воспользоваться формулой:

$$\tau^{гор} = \tau^{хол} - \frac{1}{3 \cdot \xi \Sigma_{сяч} \cdot \Sigma_{гор}} \ln \frac{T_{н.з.}}{T_0},$$

где $T_0 = 293$ К.

$$\tau^{гор} = 411,8546879 - \frac{1}{3 \cdot 0,060227 \cdot 0,389981} \ln \frac{704,93}{293} = 399,3951 \text{ см}^2.$$

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

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

Опыт показывает, что целесообразно поддерживать температуру графитовой кладки в пределах 673 – 973 К. Примем температуру графитовой кладки $T = 678$ К, тогда

$$L_{зам}^2(678) = 3196,1422 \cdot \left(\frac{678}{293}\right)^{0,48} = 4781,0126 \text{ см}^2.$$

Коэффициенты в формуле четырех сомножителей были пересчитаны средствами MS Excel и приведены в таблице 11.

Таблица 11 – коэффициенты формулы четырех сомножителей

Коэффициент	В «холодном» реакторе	В «горячем» реакторе	Изменение параметра
η	1,537	1,491	-0,046
ε	1,017	1,017	0
θ	0,785	0,836	0,052
φ	0,875	0,875	0
k_{∞}	1,073	1,109	0,036

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

$$k_{эф}^{гор} = \frac{1,109 \cdot e^{-2,42109 \cdot 10^{-5} \cdot 411,8547}}{1 + 2,42109 \cdot 10^{-5} \cdot 4781,0126} = 1,0024.$$

По сравнению с «холодным» состоянием реактора, эффективный коэффициент размножения уменьшился на 0,0415, что свидетельствует о том, что ТЭР данного реактора отрицательный.

Определим температурный коэффициент реактивности:

$$\alpha = \frac{\Delta k_{эф}}{\Delta T} = \frac{-0,0415}{678 - 400} = -0,00014928 \text{ К}^{-1}.$$

Температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \frac{k_{эф}^{гор} - k_{эф}^{хол}}{k_{эф}^{гор} \cdot k_{эф}^{хол}} = \frac{1,0024 - 1,04386}{1,0024 \cdot 1,04386} = -0,0396.$$

Наличие отрицательного температурного эффекта приводит к уменьшению эффективного коэффициента размножения при нагреве реактора, что приводит к устойчивой работе реактора.

1.6 Многогрупповой расчет

1.6.1 Методика многогруппового расчета

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

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

где i – номер группы, для которой записано уравнение;

k – номер группы;

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

$\Phi^{(i)}, \Phi^{(k)}$ – плотности потока нейтронов в соответствующей группе;

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

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

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

$\nu_f^{(k)}$ – среднее число нейтронов на один 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, описывающее утечку нейтронов из активной зоны, будет определяться по соотношению:

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

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 $D^{(i)}\Delta\Phi^{(i)} = -D^{(i)}B^2\Phi^{(i)}$, необходимо привести к виду:

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

Выражая значение плотности потока в i-ой группе получим:

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

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 по следующему соотношению:

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

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

1.6.2 Определение сходимости итерационного процесса для ядерного реактора

Для определения сходимости итерационного процесса для расчёта реактора было решено произвести расчёт ядерного реактора при комнатной температуре с помощью методики, представленной в первой главе. Для расчета в таблице 12 приведены параметры, определенный при расчете одnogрупповым методом:

Таблица 12 – параметры реактора мощностью 900 МВт

Размер ячейки под ключ	40 см
Внешний диаметр ТК	12,4 см
Внутренний диаметр ТК	12 см
Число твэлов	18
Диаметр топливной таблетки	1,78 см
Внешний диаметр твэла	2 см
Высота активной зоны	646,3 см
Диаметр активной зоны	807,8 см

Следует заметить, что при использовании вышеназванных параметров, полученное значение эффективного коэффициента размножения было неудовлетворительным, что потребовало очередной оптимизации. Оптимизированные параметры приведены в таблице 13.

Таблица 13 – оптимизированные параметры реактора при использовании многогруппового метода

Размер ячейки под ключ	40 см
Внешний диаметр ТК	8,8 см
Внутренний диаметр ТК	8,4 см
Обогащение	10%
Диаметр топливной таблетки	1 см
Внешний диаметр твэла	1,22 см
Скорость теплоносителя	4,625 м/с

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 – нитрид урана (10% обогащения по U^{235}), оболочка – сталь IX18H9T, теплоноситель – свинец, замедлитель – С). Температура всех элементов реактора принимается равной 20 °С.

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

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

где ρ – плотность вещества, г/см³;

M – молярная масса элемента.

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

$$N_{\text{гоми}} = N \cdot \beta_i, \text{ ядер/см}^3,$$

где β_i – доля материала по площади активной зоны.

Тогда, с учетом долей всех составляющих ячейки, концентрации элементов равны:

$$N_{U^{235}} = 3,42658 \cdot 10^{21} \cdot 0,008831 = 3,0261 \cdot 10^{19}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{U^{238}} = 3,08392 \cdot 10^{22} \cdot 0,008831 = 2,72349 \cdot 10^{20}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{N^{14}} = 3,42658 \cdot 10^{22} \cdot 0,008831 = 3,0261 \cdot 10^{20}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Pb^{207}} = 3,05859 \cdot 10^{22} \cdot 0,021474 = 6,56804 \cdot 10^{20}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{C^{12}} = 8,52498 \cdot 10^{22} \cdot 0,962006 = 8,20108 \cdot 10^{22}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Fe} = 6,11829 \cdot 10^{22} \cdot 0,006968 = 4,26326 \cdot 10^{20}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Cr} = 1,5577 \cdot 10^{22} \cdot 0,006968 = 1,08541 \cdot 10^{20}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Ni} = 7,78849 \cdot 10^{21} \cdot 0,006968 = 5,42706 \cdot 10^{19}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Ti} = 6,9231 \cdot 10^{20} \cdot 0,006968 = 4,82405 \cdot 10^{18}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Mn} = 1,29808 \cdot 10^{22} \cdot 0,006968 = 9,0451 \cdot 10^{18}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{mon} = 3,42658 \cdot 10^{22} \cdot 0,008831 = 3,0261 \cdot 10^{20}, \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{KM} = 8,65388 \cdot 10^{22} \cdot 0,006968 = 6,03007 \cdot 10^{20}, \text{ ядер/см}^3.$$

Также был произведён пересчёт сечений с поправками на резонансную самоэкранировку:

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

где σ_{t_m}, N_{m_i} – сечения и ядерная концентрация m-го 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:

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

После постановки концентраций и необходимых сечений в расчёт итерационного процесса были получены следующий график:

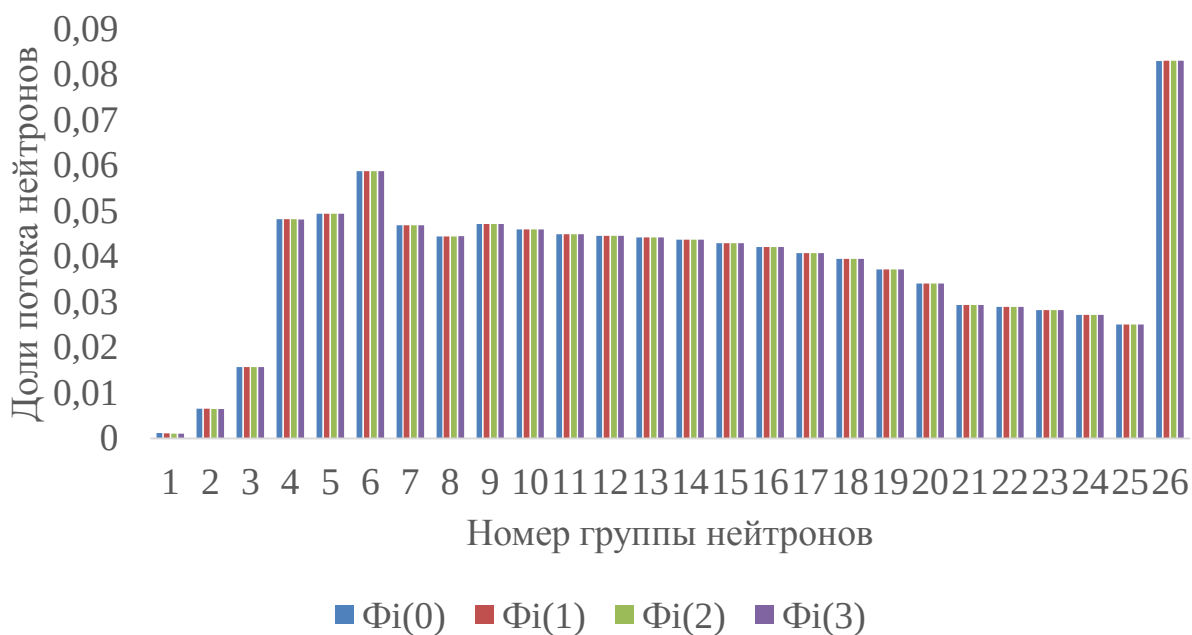


Рисунок 6 – график сходимости итерационного процесса

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

1.6.3 Методика нормирования плотности потока нейтронов и определения коэффициента размножения в конечной среде

Поскольку, в прошлой главе были определены доли потоков нейтронов, то можно посчитать распределение плотностей потока нейтронов по различным группам. Для этого необходимо посчитать полную плотность потока тепловых нейтронов вне зависимости от группы:

$$\Phi = \frac{Q}{q_f \cdot \Sigma_f \cdot V_{a.z.}}, \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1},$$

где q_f – энергия одного деления;

$V_{a.z.}$ – объем активной зоны.

При этом, абсолютная величина плотности потока нейтронов в определенной группе будет равна:

$$\Phi_i = \Phi \cdot \delta_i, \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}.$$

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

$$k_{эфф} = \frac{\overline{\nu \cdot \Sigma_f}}{D \cdot B^2 + \overline{\Sigma_a}},$$

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

$$\overline{\Sigma_a} = \sum_{i=1}^{26} \Sigma_{ai} \cdot \delta_i,$$

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

где δ_i – отношение потока i -ой группы к общему потоку.

Так же необходимо привести поправки для расчёта нейтронно-физических характеристик для реактора в горячем состоянии.

Эффективная температура нейтронного газа определяется по формуле:

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

Сечения поглощения и рассеяния берутся при температуре замедлителя.

Сечения при температуре нейтронного газа определяются следующим образом:

$$\overline{\sigma_a}(T_{н.г.}) = \sigma_{a_0} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot f_a(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{zp}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \text{ барн;}$$

$$\overline{\sigma_f}(T_{н.г.}) = \sigma_{f_0} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot f_f(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{zp}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \text{ барн.}$$

1.6.4 Сравнение спектра плотностей потоков нейтронов и коэффициента размножения для горячего реактора

$$\Phi = \frac{Q}{q_f \cdot \Sigma_f \cdot V_{a.з.}} = 4,82366 \cdot 10^{13}, \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}.$$

Нормированные плотности потоков для нейтронов различных групп представлены на рисунке 7.

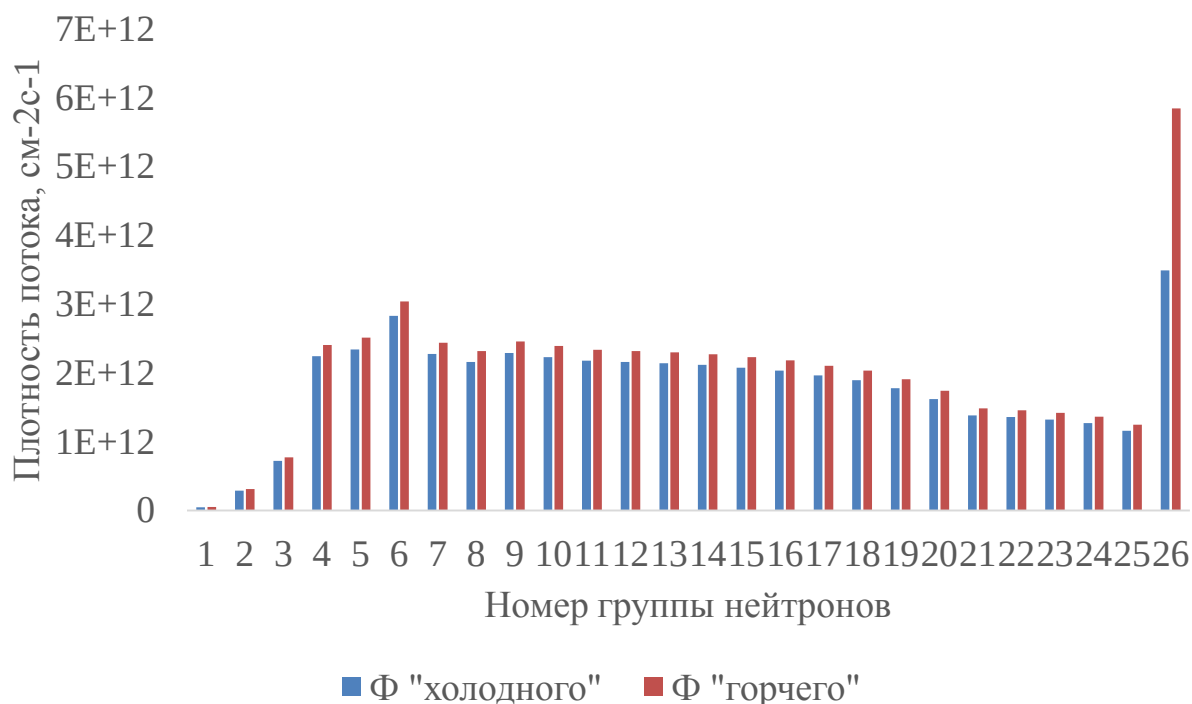


Рисунок 7 – спектры плотностей потоков нейтронов для холодного и горячего реактора

Если проанализировать полученный график, очевидно, что спектр для горячего реактора является менее жестким.

Также необходимо определить коэффициент размножения нейтронов для холодного и горячего состояния. Полученные значения были сведены в таблицу 14.

Таблица 14 – эффективный коэффициент размножения и запас реактивности

	$k_{эф}$	$\rho_{зап}$
Холодный реактор	1,28600	0,22239
Горячий реактор	1,21287	0,17551

1.6.5 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, В¹¹ и В¹⁰ с природным изотопным составом бора. Следующим шагом необходимо изменять концентрацию таким образом, чтобы $k_{эф}$ был максимально близок к 1.

При добавлении карбида бора, были сравнены спектры плотностей потоков нейтронов. Изменение спектра плотностей потоков нейтронов можно наблюдать на рисунке 8. Если проанализировать полученную диаграмму, можно заметить, что основное влияние поглотителя приходится на тепловую группу. Это вызвано тем, что увеличивается макроскопическое сечение поглощения нейтронов тепловой группы, что приводит к уменьшению их числа.

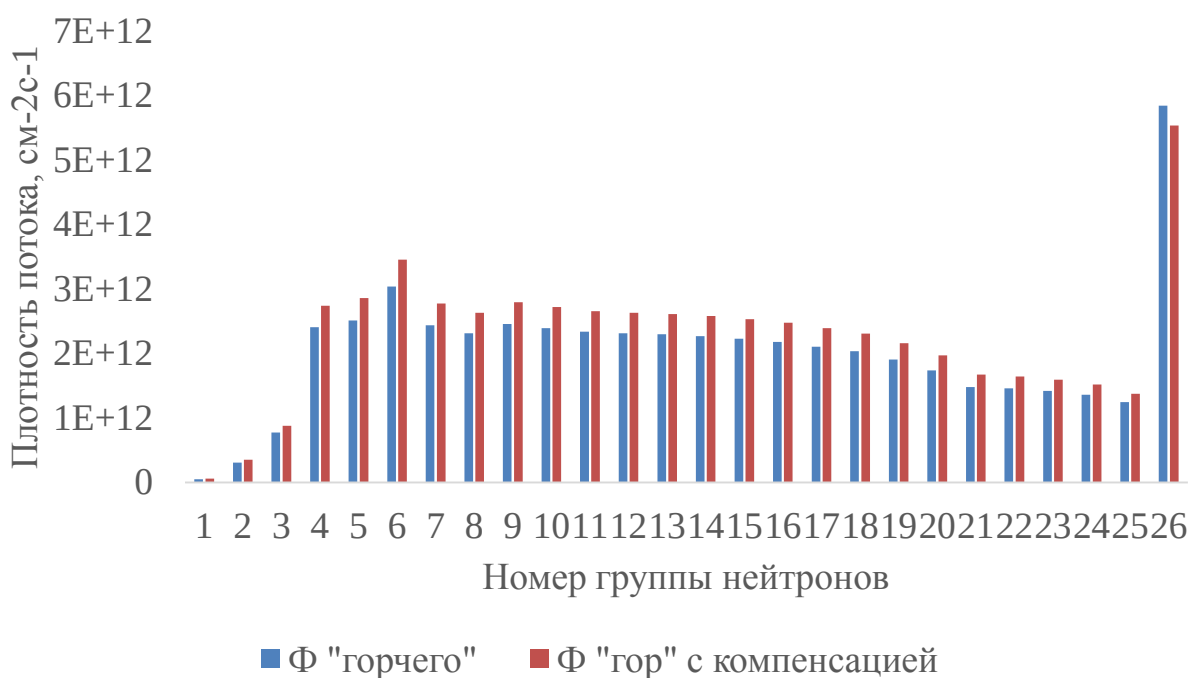


Рисунок 8 – изменение спектра плотностей нейтронов при добавлении В₄С

1.6.6 Определение нуклидного состава и длительности кампании ядерного топлива

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

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

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:

$$T_{ЯТ} = 1450 \text{ суток.}$$

Помимо определения длительности кампании, было проведено сравнение спектров плотностей потоков нейтронов на начало и конец кампании ядерного топлива, которое можно наблюдать на рисунке 9.

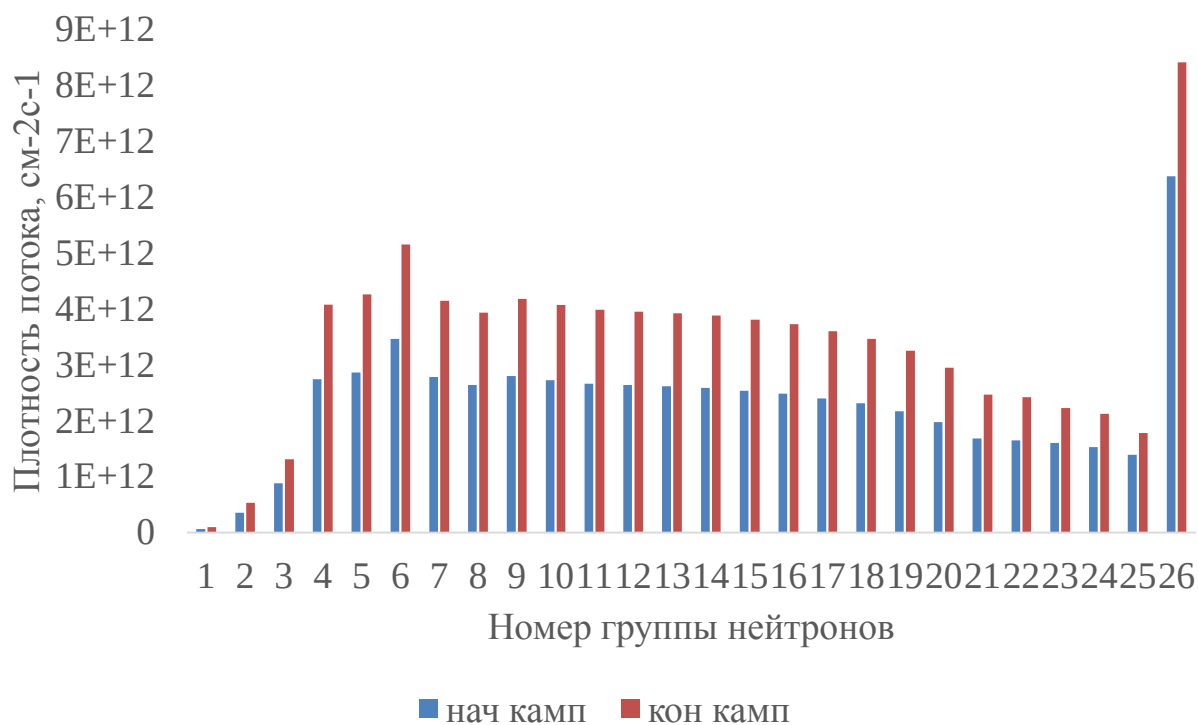


Рисунок 9 – спектры плотностей потоков нейтронов на начало и конец кампании ядерного топлива

Также были построены графики изменения запаса реактивности и нуклидного состава ЯТ, которые можно наблюдать на рисунках 10, 11, 12 и 13 соответственно.

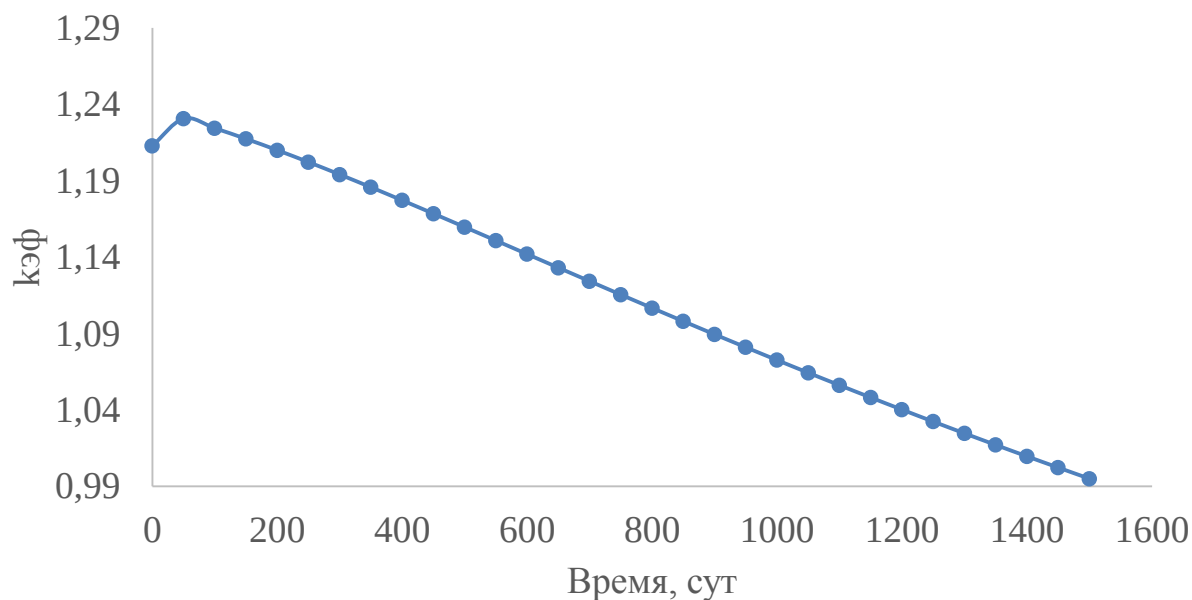


Рисунок 10 – изменение запаса реактивности в зависимости от времени работы ядерного реактора

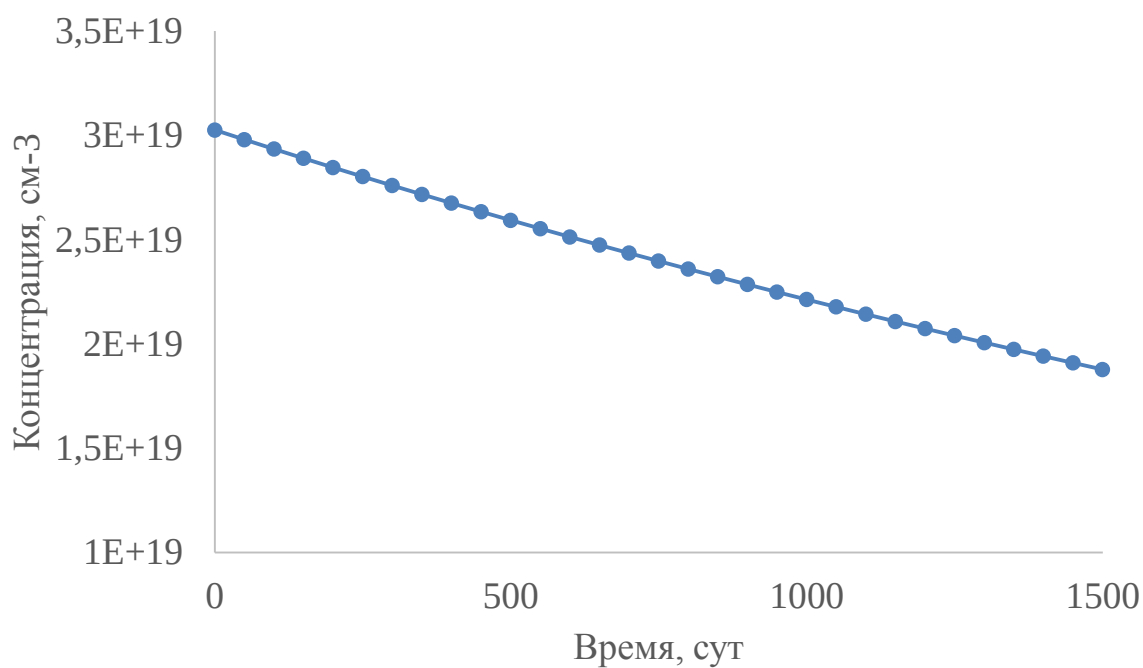


Рисунок 11 – изменение концентрации U^{235} в течение кампании

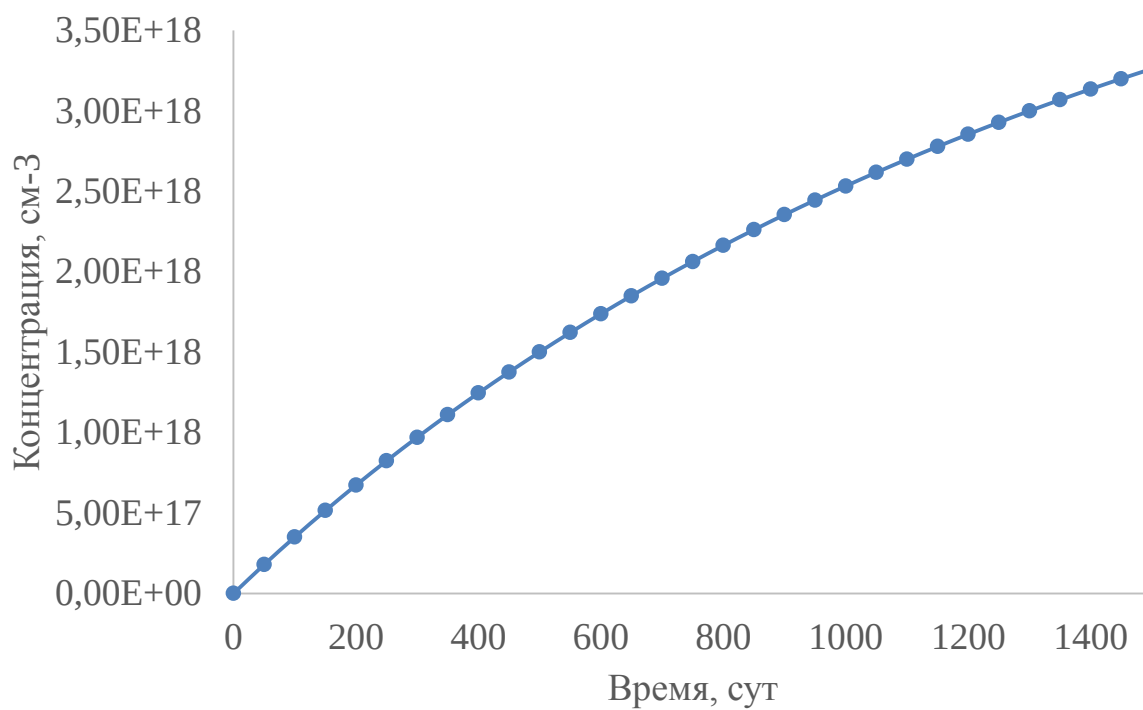


Рисунок 12 – изменение концентрации Pu^{239} в течение кампании

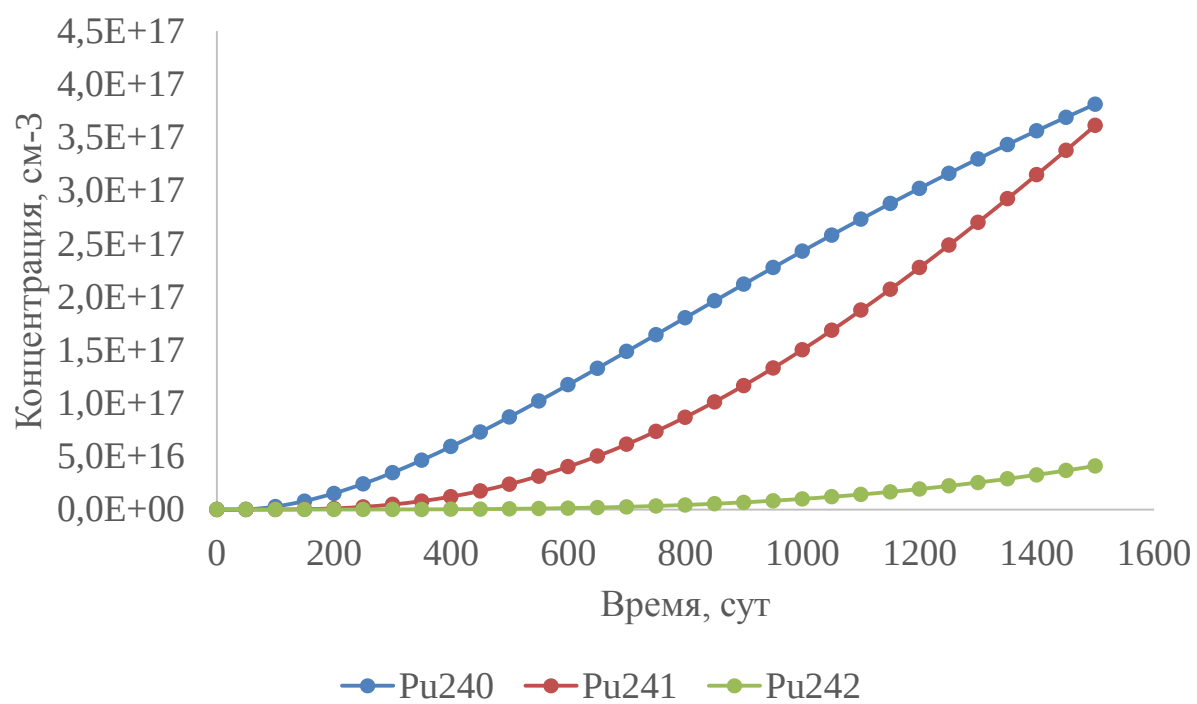


Рисунок 13 – изменение остальных изотопов плутония в течение кампании

1.7 Расчет ядерного реактора с помощью программного обеспечения WIMS-D5

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

1.7.1 Расчет «холодного» реактора

В приложении А представлен код, содержащий в себе входные данные, предоставляемые программе для расчета «холодного» реактора, такие как: количество групп нейтронов (в нашем случае всегда 26), оптимизированные радиусы зон материалов (поскольку в WIMS-е ячейка представляет собой слоистый цилиндр), температуры топлива, конструкционных материалов, теплоносителя и замедлителя, концентрации.

Поскольку данное программное обеспечение рассчитывает лишь коэффициент размножения в бесконечно среде, можно рассчитать эффективный коэффициент размножения по следующей формуле:

$$k_{эф} = \frac{k_{\infty} \cdot e^{-B^2 \cdot \tau_p}}{1 + B^2 \cdot L_p^2}.$$

Вероятность избежать утечки примем равной той, что была рассчитана одногрупповым методом. Полученные коэффициенты приведены в таблице 15. Таблица 15 – коэффициенты размножения в бесконечной и конечной средах в «холодном» реакторе, посчитанные с помощью WIMS-D5

	k_{∞}	$k_{эф}$
«Холодный» реактор	1,231273	1,197493

На рисунке 14 указаны доли плотности потока нейтронов в зависимости от номера группы.

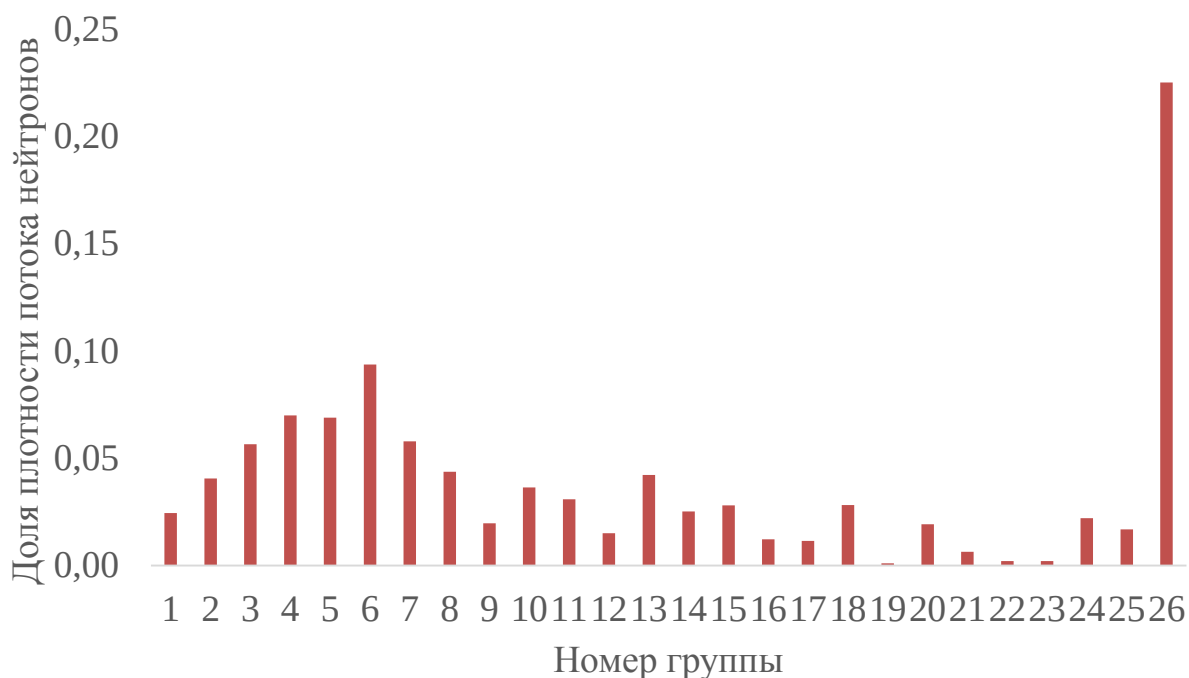


Рисунок 14 – доли плотности потока нейтронов от группы нейтронов

1.7.2 Расчет «горячего» реактора

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

В таблице 16 указаны полученные данные.

Таблица 16 – коэффициенты размножения в бесконечной и конечной средах в «горячем» реакторе, посчитанные с помощью WIMS-D5

	k_{∞}	$k_{эф}$
«Горячий» реактор	1,272851	1,149975

На рисунке 15 указаны доли плотности потока нейтронов в зависимости от номера группы.

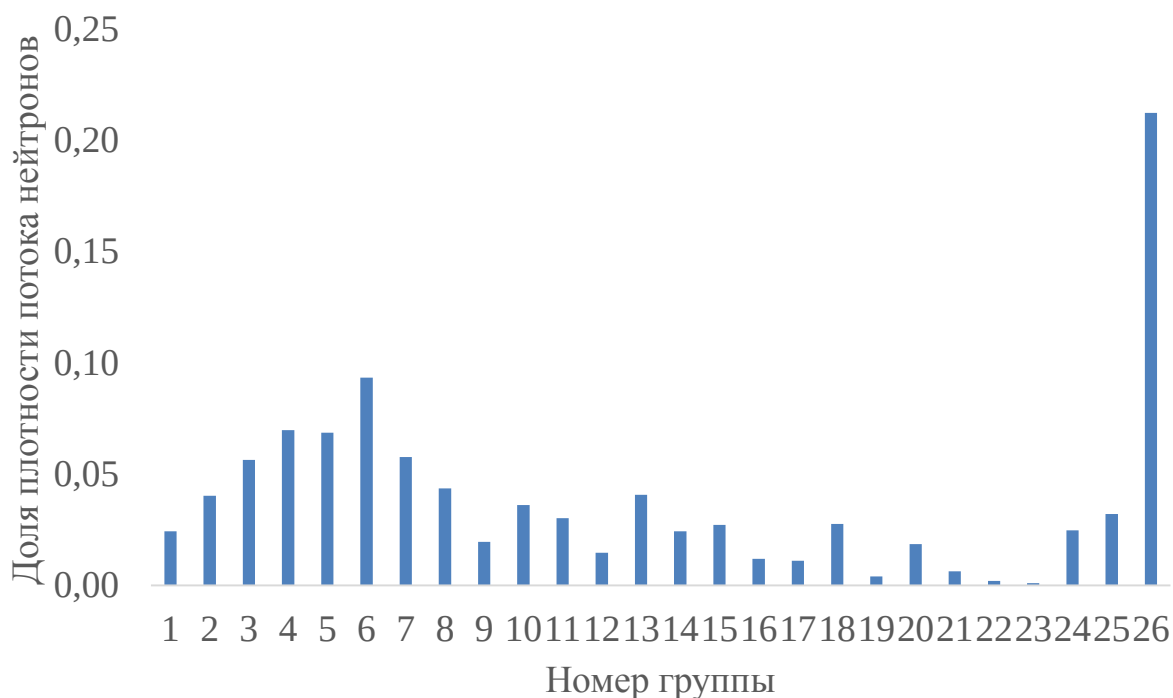


Рисунок 15 - доли плотности потока нейтронов от группы нейтронов

1.7.3 Сравнение полученных данных

Чтобы проверить правильность расчетов, ниже приведена сравнительная таблица эффективных коэффициентов размножения, рассчитанных разными методами.

Таблица 17 – эффективный коэффициент размножения разными методами

Метод	«холодный» реактор	«горячий» реактор
Многогрупповой	1,2219	1,1387
WIMS	1,1975	1,1500
Погрешность, % (относительно WIMS)	2,038	0,980

На основе полученных данных можно сделать вывод, что реализованный вручную многогрупповой расчет является достаточно точным. Погрешность составила 1-2%.

1.8 Отравление реактора

1.8.1 Отравление ксеноном-135

1.8.1.1 Стационарное отравление ксеноном-135

Стационарные концентрации йода и ксенона можно посчитать по следующим формулам:

$$N_I^{cm} = \frac{\omega_I \Sigma_f \Phi}{\lambda_I},$$

$$N_{Xe}^{cm} = \frac{(\omega_I + \omega_{Xe}) \Sigma_f \Phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi},$$

где ω_I – вероятность появления ^{135}I из ^{235}U ;

Σ_f – макроскопическое сечение деления ^{235}U , см^{-1} ;

Φ – плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

λ_I – постоянная распада ^{135}I , с^{-1} ;

ω_{Xe} – вероятность появления ^{135}Xe из ^{235}U ;

λ_{Xe} – постоянная распада ^{135}Xe , с^{-1} ;

σ_{Xe} – микроскопическое сечение поглощения ^{135}Xe , б.

Плотность потока нейтронов в ядерном реакторе можно вычислить по следующей формуле:

$$\Phi = \frac{3,2 \cdot 10^{16} \cdot N}{\Sigma_f^* \cdot V},$$

где N – мощность, МВт;

$\Sigma_f^* = \Sigma_f \cdot x$, x – доля топлива в ячейке;

V – объем активной зоны, см^3 .

$$\Phi = 4,82366 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}.$$

Постоянная распада связана с периодом полураспада следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}.$$

Отсюда следует, что постоянные распада йода и ксенона равны:

$$\lambda_I = \frac{\ln(2)}{6,7 \cdot 3600} = 2,87374 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1},$$

$$\lambda_{Xe} = \frac{\ln(2)}{9,2 \cdot 3600} = 2,09284 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1},$$

Соответственно, стационарные концентрации йода и ксенона равны:

$$N_I^{cm} = \frac{0,056 \cdot 0,017502 \cdot 4,82366 \cdot 10^{13}}{2,87374 \cdot 10^{-5}} = 1,6164 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3},$$

$$N_{Xe}^{cm} = \frac{(0,056 + 0,003) \cdot 0,017502 \cdot 4,82366 \cdot 10^{13}}{2,09284 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 4,82366 \cdot 10^{13}} = 3,2354 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

Накопление ядер ^{135}Xe и ^{135}I после пуска реактора происходит по следующим законам:

$$N_I(t) = N_I^{cm} (1 - e^{-\lambda_I t}),$$

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

где t – прошедшее время, с.

Графики динамики изменения ^{135}Xe и ^{135}I при выходе на мощность изображены на рисунке 16.

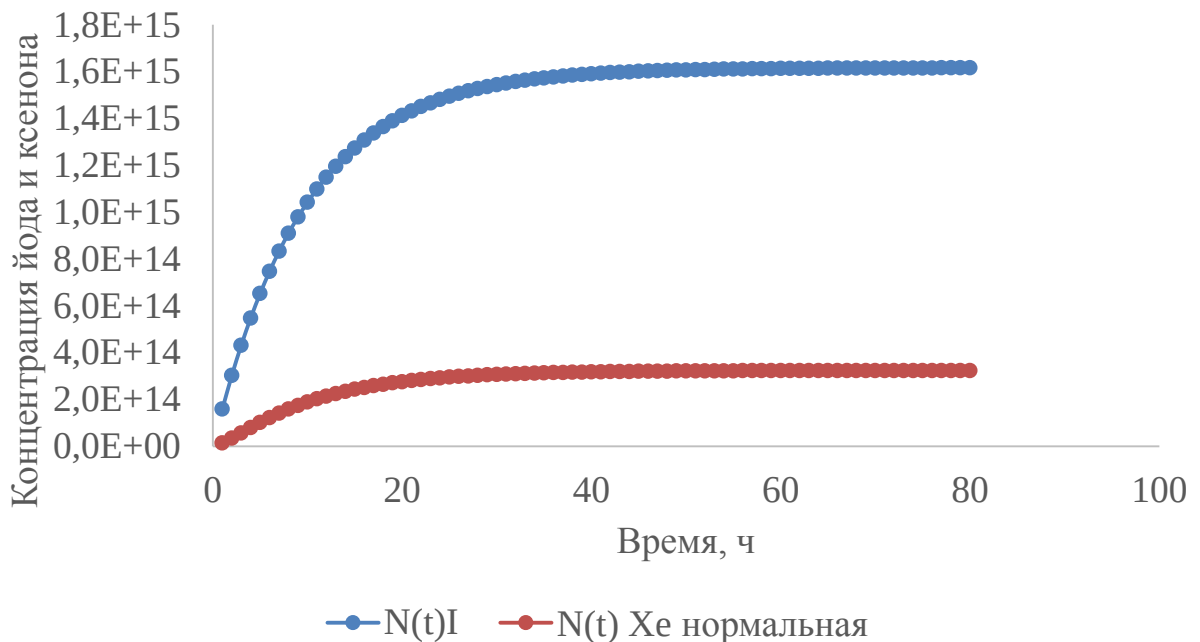


Рисунок 16 – динамика изменения концентраций йода и ксенона при выходе на мощность

Исходя из полученных данных, концентрация йода выходит в стационар (90% от N_I^{cm}) через 22 часа, а концентрация ксенона – через 24 часа.

Потеря реактивности при отравлении ксеноном в любой момент времени t до установления стационарного значения определяется из соотношений:

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{Xe}^{cm} [0,4e^{-10^{-4}t} + (1-1,4e^{-2,9 \cdot 10^{-5}t})],$$

$$\text{где } \rho_{Xe}^{cm} = -\theta \frac{(\omega_I + \omega_{Xe})}{(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi)} \sigma_{Xe} \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} \Phi.$$

$$\begin{aligned} \rho_{Xe}^{cm} &= -0,836479 \frac{(0,056 + 0,003)}{(2,09284 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 4,82366 \cdot 10^{13})} 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot \frac{0,017502}{0,028403} 4,82366 \cdot 10^{13} = \\ &= -0,026203. \end{aligned}$$

Зависимость стационарного отравления ксеноном при выходе на мощность изображена на рисунке 17.

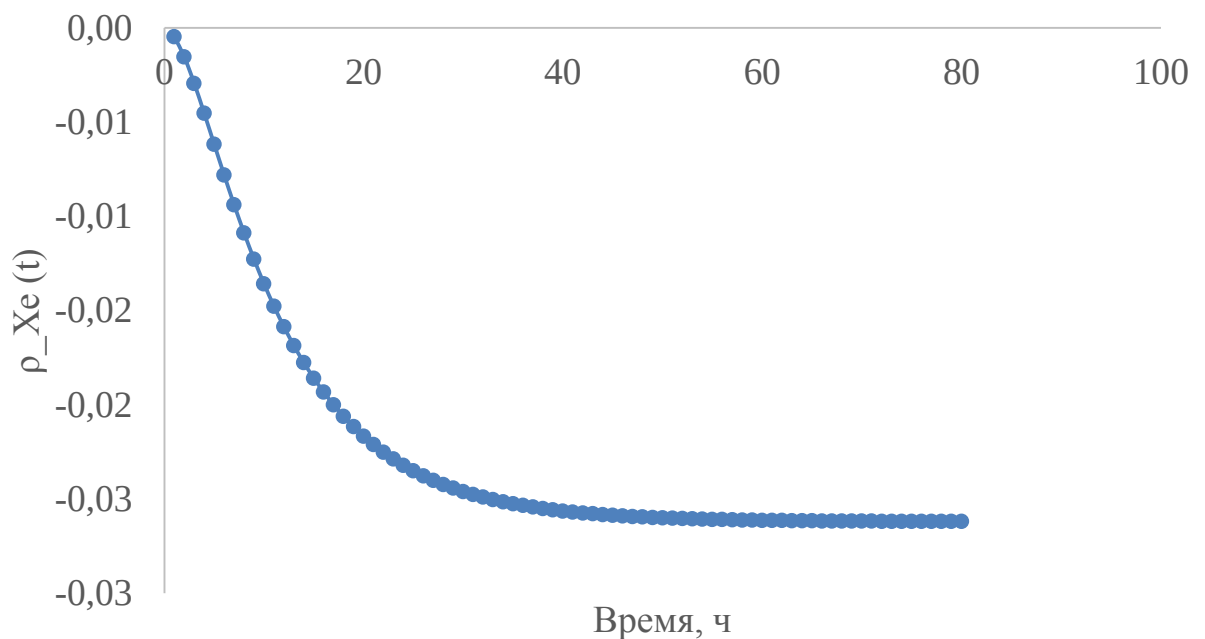


Рисунок 17 - зависимость стационарного отравления ксеноном при выходе на мощность от времени

1.8.1.2 Нестационарное отравление ксеноном-135

Изменение мощности реактора приводит к нарушению динамического равновесия между ростом и убылью ксенона. После остановки или снижения мощности происходит временное увеличение концентрации ксенона вследствие

распада йода и уменьшения выгорания ксенона (плотность потока нейтронов уменьшается).

Уравнения, описывающие отравление реактора ксеноном после остановки, представлены ниже (при $\Phi=0$):

$$N_I(t) = N_I^{cm} e^{-\lambda_I t},$$

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

Графики изменения концентраций йода и ксенона после остановки реактора представлены на рисунке 18.

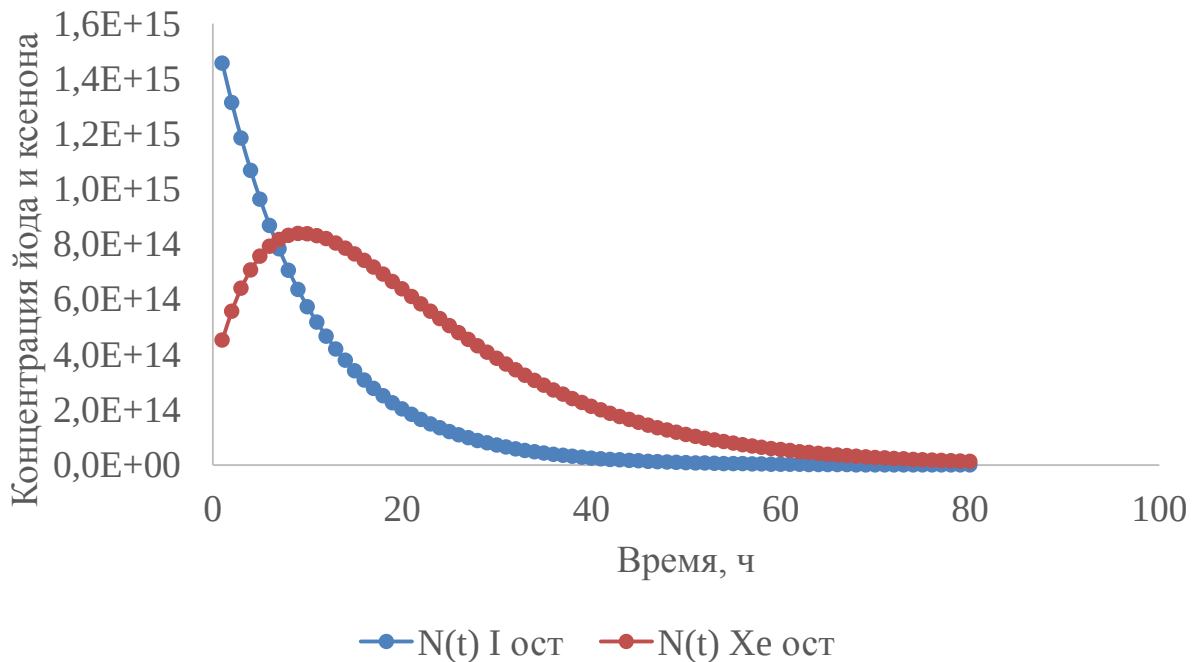


Рисунок 18 – зависимость концентраций йода и ксенона после остановки реактора

Увеличение концентрации ксенона и соответствующее уменьшение запаса реактивности при снижении мощности называют «йодной ямой».

Изменение реактивности после остановки реактора описывается следующей формулой:

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{Xe}^{cm} \left[\frac{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi}{\lambda_{Xe} - \lambda_I} (e^{-\lambda_I t} - e^{-\lambda_{Xe} t}) + e^{-\lambda_{Xe} t} \right],$$

а время достижения максимальной глубины «йодной ямы» вычисляется так:

$$t_{\text{й.я.}} = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \ln\left(\frac{\lambda_I}{\lambda_{Xe}} \cdot \frac{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe}\Phi}{\lambda_I + \sigma_{Xe}\Phi}\right).$$

Изменение реактивности после остановки реактора изображено на рисунке 19.

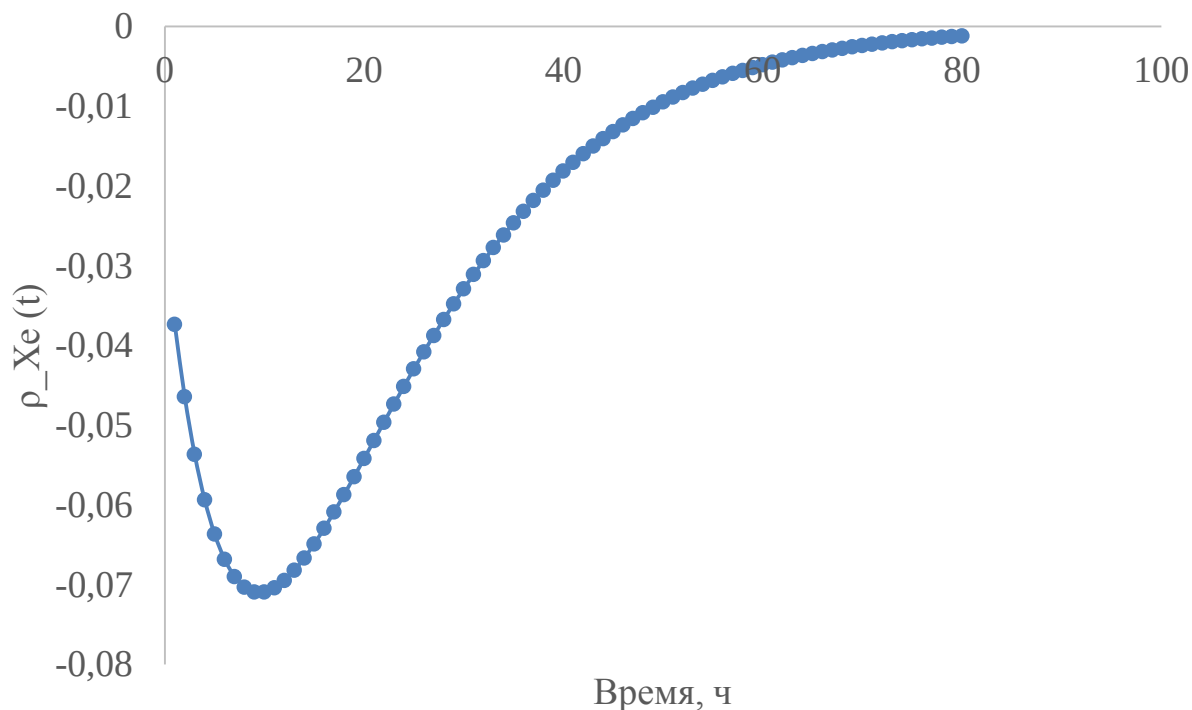


Рисунок 19 – изменение реактивности после остановки реактора

Время достижения максимальной глубины «йодной ямы» равно

$$t_{\text{й.я.}} = \frac{1}{2,87374 \cdot 10^{-5} - 2,09284 \cdot 10^{-5}} \ln\left(\frac{2,87374 \cdot 10^{-5}}{2,09284 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{2,09284 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 4,82366 \cdot 10^{13}}{2,87374 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 4,82366 \cdot 10^{13}}\right) =$$

$$= 34159,9254 \text{ с} = 9,4888 \text{ ч.}$$

1.8.2 Отравление самарием-149

1.8.2.1 Стационарное отравление самарием-149

Стационарные концентрации прометия и самария можно посчитать по следующим формулам:

$$N_{Pm}^{cm} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_{Pm}},$$

$$N_{Sm}^{cm} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f}{\sigma_{Sm}},$$

где ω_{Pm} – вероятность появления ^{149}Pm из ^{235}U ;

λ_{Pm} – постоянная распада прометия, с^{-1} ;

σ_{Sm} – микроскопическое сечение поглощения ^{149}Sm .

Постоянная распада прометия считается так:

$$\lambda_{Pm} = \frac{\ln(2)}{47 \cdot 3600} = 4,09661 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}.$$

Стационарные концентрации прометия и самария равны:

$$N_{Pm}^{cm} = \frac{0,013 \cdot 0,017502 \cdot 4,82366 \cdot 10^{13}}{4,09661 \cdot 10^{-6}} = 2,6322 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3},$$

$$N_{Sm}^{cm} = \frac{0,013 \cdot 0,017502}{5,92 \cdot 10^{-20}} = 3,8433 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Накопление ядер ^{149}Pm и ^{149}Sm после пуска реактора происходит по следующим законам:

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

$$N_{Sm}(t) = N_{Sm}^{cm} [1 - e^{-\Phi \sigma_{Sm} t}] - \frac{N_{Pm}^{cm}}{\frac{\Phi \sigma_{Sm}}{\lambda_{Pm}} - 1} [e^{-\lambda_{Pm} t} - e^{-\Phi \sigma_{Sm} t}].$$

Графики динамики изменения ^{149}Pm и ^{149}Sm при выходе на мощность изображены на рисунке 20.

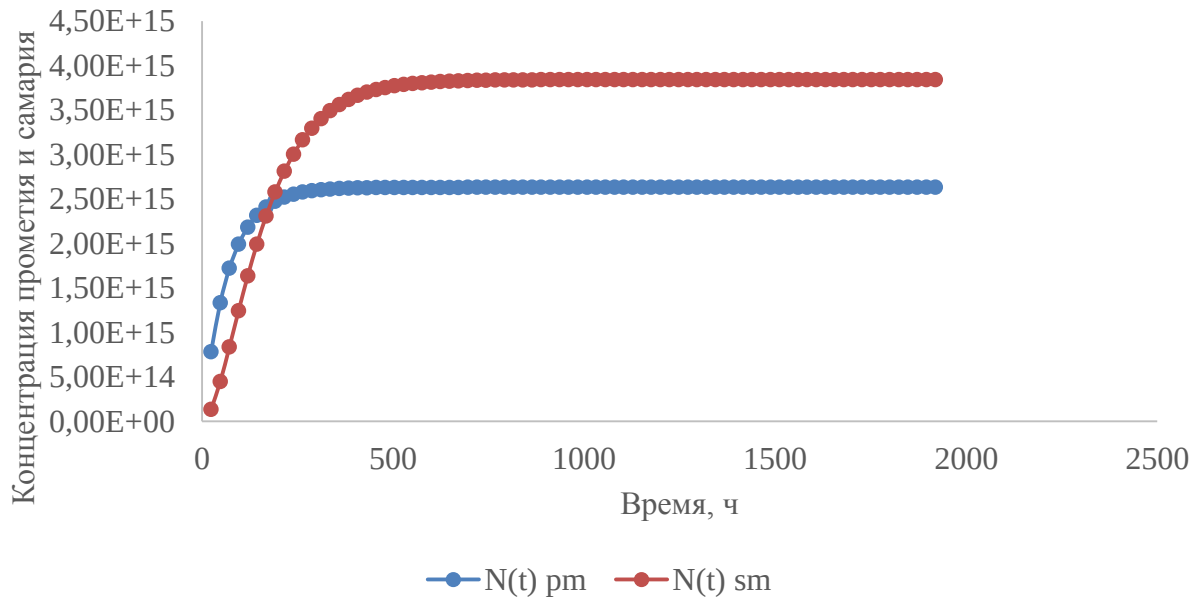


Рисунок 20 - динамика изменения концентраций прометия и самария при выходе на мощность

Исходя из полученных данных, концентрация прометия выходит в стационар (90% от N_{pm}^{cm}) через 7 суток, а концентрация самария – через 14 суток.

Потеря реактивности при отравлении самарием в любой момент времени t до установления стационарного значения определяется из соотношений:

$$\rho_{Sm}(t) = \rho_{Sm}^{cm} \left[1 - \frac{\lambda_{pm} e^{-\Phi \sigma_{Sm} t}}{\lambda_{pm} - \Phi \sigma_{Sm}} + \frac{\Phi \sigma_{Sm} e^{-\lambda_{pm} t}}{\lambda_{pm} - \Phi \sigma_{Sm}} \right],$$

где $\rho_{Sm}^{cm} = -\theta \omega_{pm} \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}$.

$$\rho_{Sm}^{cm} = -0,836479 \cdot 0,013 \cdot \frac{0,017502}{0,028403} = -0,0067.$$

Зависимость стационарного отравления самарием при выходе на мощность изображена на рисунке 21.

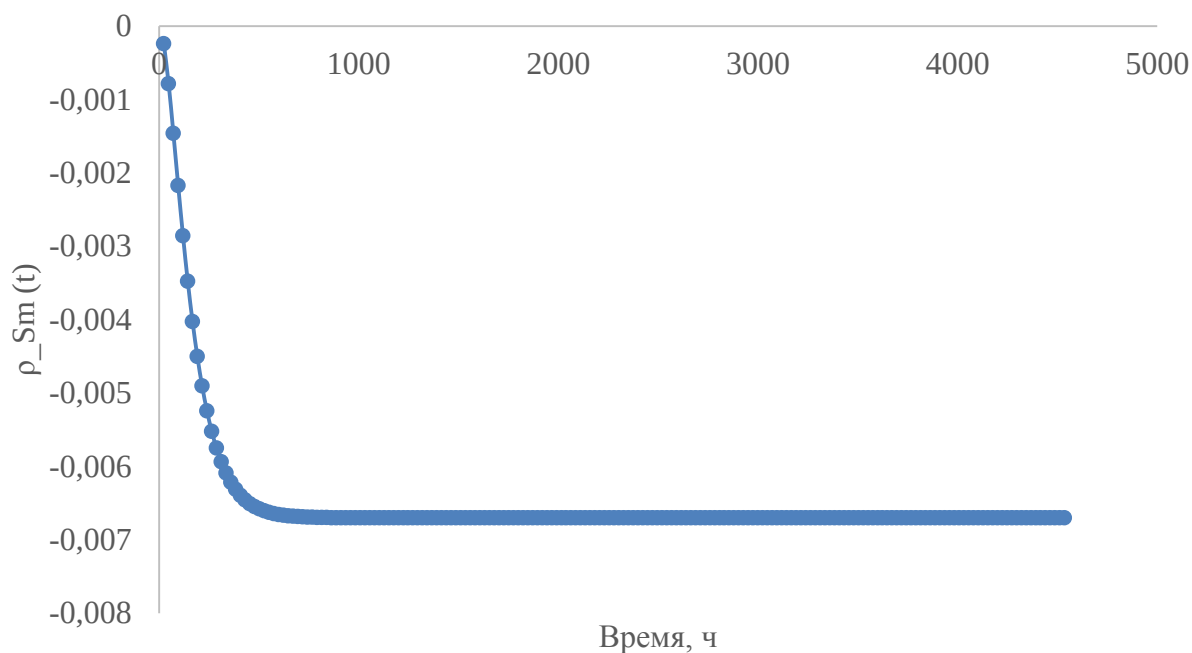


Рисунок 21 - зависимость стационарного отравления самарием при выходе на мощность от времени

1.8.2.2 Нестационарное отравление самарием-149

После остановки реактора убыль самария прекращается, а прибыль его из прометия продолжается до полного распада последнего.

Уравнения, описывающие отравление реактора самарием после остановки, представлены ниже (при $\Phi=0$):

$$N_{Pm}(t) = N_{Pm}^{cm} e^{-\lambda_{Pm} t},$$

$$N_{Sm}(t) = N_{Sm}^{cm} + N_{Pm}^{cm} (1 - e^{-\lambda_{Pm} t}).$$

Графики изменения концентраций прометия и самария после остановки реактора представлены на рисунке 22.

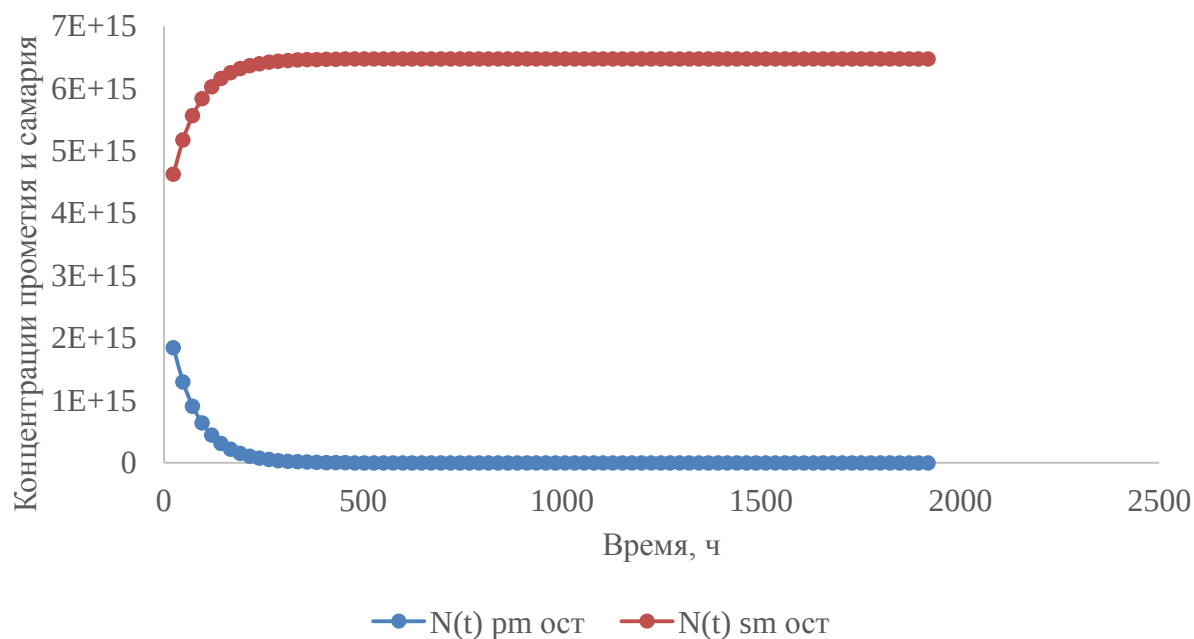


Рисунок 22 - зависимость концентраций прометия и самария после остановки реактора

Уменьшение запаса реактивности при накоплении самария после остановки носит название «прометиевый провал».

Изменение реактивности после остановки реактора описывается следующей формулой:

$$\rho_{sm}(t) = \rho_{sm}^{cm} \frac{\sigma_{sm}}{\lambda_{pm}} \Phi(1 - e^{-\lambda_{pm}t}).$$

Изменение реактивности после остановки реактора изображено на рисунке 23.

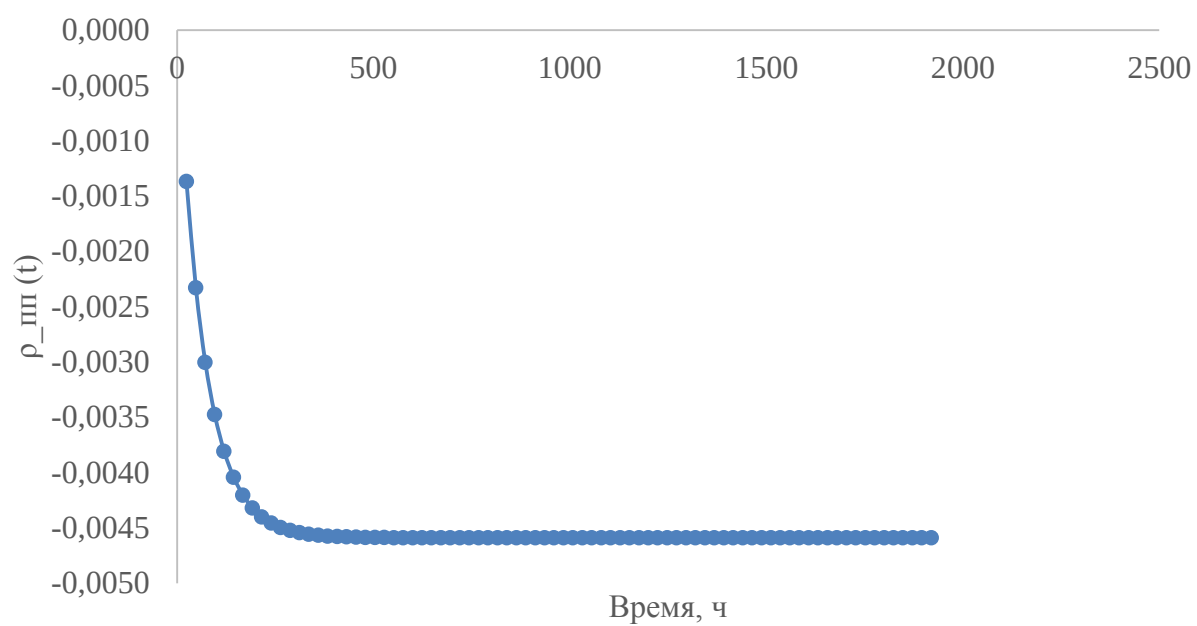


Рисунок 23 - изменение реактивности после остановки реактора

2 Социальная ответственность

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

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

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

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

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

2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 18.

Таблица 18 — основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-15 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ, Кафедра ФЭУ НИ ТПУ	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и так далее)	—	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	—	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность

На бакалавра, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

2.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

2.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

2.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 24.

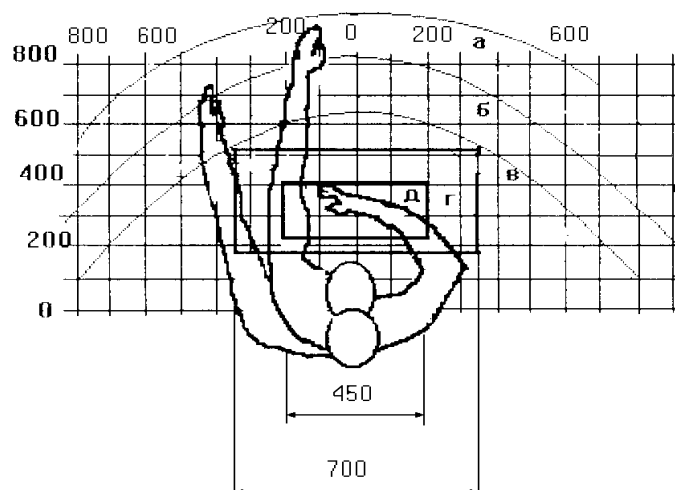


Рисунок 24 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук;

б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в – зона легкой досягаемости ладони;

г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура — в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);

Документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони — в (слева) — литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола — литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не

менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

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

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500 – 600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической

напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

2.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда — это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

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

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность — 40%, скорость движения воздуха — 0,1 м/с, температура летом — 20 – 25 °С, зимой

— 13 – 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

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

Плотность магнитного потока должна быть не более:

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения

при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [9] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

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

2.2.4 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

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

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;

- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклчение в корпус токоведущих частей).

2.2.5 Пожарная и взрывная безопасность

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

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

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

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

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и

оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

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

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения — предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

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

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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 данной работы был разработан проект ЯЭУ, которая предназначена для производства электроэнергии. Разработка ЯЭУ в силу своей специфики будет иметь своим целевым рынком госкорпорации по атомной энергетике. Примером могут служить такие госкорпорации как Росэнергоатом (Россия), Минэнерго (Беларусь), Энергоатом (Украина) и т.п.

Рынок услуг по разработке ЯЭУ можно сегментировать по множеству критериев, основными из которых являются уровень развития атомной энергетики страны и электрическая мощность установки.

Таблица 20 – Карта сегментирования рынка услуг по ЯЭУ

		Электрическая мощность установки		
		До 440 МВт	От 440 МВт до 1000 МВт	От 1000 МВт до 1800 МВт
Уровень развития атомной энергетики	Высокий			
	Средний			
	Низкий			

Необходимость для стран с низким развитием атомной энергетики ядерных установок с малыми и средними мощностями, говорит о том, что в

стране энергетика в целом может быть, как на низком, так и на достаточно высоком уровне. Развитие атомной энергетики могло идти как параллельно развитию традиционной энергетики страны, так и опираясь на огромную базу развития. Аналогична ситуация для стран со средним уровнем развития атомной энергетики.

3.2 Технология QuaD

Технология представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки, ее перспективность на рынке и позволяет принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации. В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по столбальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок) представлена в таблице 21.

Таблица 21 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Показатели оценки качества разработки					
1. Надежность	0,15	90	100	0,9	13,5
2. Безопасность	0,15	100	100	1	15
3. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,2	90	100	0,9	18
4. Длительность эксплуатации	0,15	60	100	0,6	9
5. Износостойкость	0,2	100	100	1	20

Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
6.Конкурентоспособность проекта	0,15	70	100	0,7	10.5
Итого	1	520	600	5,2	86

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$П_{\text{ср}} = \sum B_i \cdot B_i,$$

где $П_{\text{ср}}$ – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение $П_{\text{ср}}$ позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования.

Как видно из анализа по технологии QuaD, данное исследование составило 86 баллов, что говорит о перспективности разработки.

3.3 SWOT-анализ

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

Сильные стороны. Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован.

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

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

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Матрица SWOT-анализа представлена в таблице 22.

Таблица 22 – Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны: С1. Рост теплопроводности топлива с ростом температуры; С2. Высокая теплопроводность теплоносителя; С3. Использование высокоплотного топлива увеличивает концентрацию делящегося материала.	Слабые стороны: Сл1. Использование канальной схемы делает невозможным создание корпуса реактора, что уменьшает его безопасность; Сл2. Низкая теплоемкость теплоносителя; Сл3. Высокая температура плавления 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; 2. Увеличение температуры увеличит КПД установки.
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 несанкционированные действия 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. Использование в качестве теплоносителя свинца, из-за общего высокого температурного фона снижает интерес государства к данной виду ЯЭУ.

Проанализировав характер НТР 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 Планирование научно-исследовательских работ

3.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

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 23.

Таблица 23 – 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 теме уран-графитовых реакторов	Руководитель, Бакалавр
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, Бакалавр
	4	Календарное планирование работ по теме реактора УГР	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований конструкции АкЗ	Бакалавр
	6	Разработка чертежей	Бакалавр
	7	Анализ результатов расчета и планирование дальнейших действий при расчете ВКР	Руководитель
Разработка технической документации и проектирование	8	Разработка плана объекта с предложенным оборудованием	Бакалавр
	9	Оценка эффективности предложенного проекта	Бакалавр

		реакторной установки	
	10	Составление пояснительной записки	Бакалавр
	11	Проверка правильности выполнения ГОСТа	Руководитель, Бакалавр
Оформление отчета по НИР	12	Подготовка к предоставлению проекта и его представление	Бакалавр

3.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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

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

$$t_{ожи} = \frac{3t_{мини} + 2t_{макс i}}{5},$$

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

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

$t_{макс i}$ – 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.

3.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

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

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

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;

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

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

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

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

$$t_{\text{mini}} = 1$$

$$t_{\text{maxi}} = 3$$

$$t_{\text{ожсi}} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1,8$$

$$T_{\text{pi}} = \frac{1,8}{1} = 1,8$$

$$T_{\text{ki}} = 1,8 \cdot 1,22 = 2$$

Все значения, полученные при расчетах по вышеприведенным формулам, были сведены в таблицу 24.

Таблица 24 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожi}$, 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 теме водо-водяных реакторов	7	1	10	2	8,2	1,4	4,1	0,7	5	1
3. Выбор направления исследований	1	1	2	2	1,4	1,4	0,7	0,7	1	1
4. Календарное планирование работ по теме реактора УГР	-	1	-	3	-	3,6	-	3,6	-	4
5. Проведение теоретических расчетов и обоснований конструкции АкЗ	10	-	20	-	14	-	14	-	17	-
6. Разработка чертежей	3	-	7	-	4,6	-	4,6	-	5,6	-
7. Анализ результатов расчета и планирование дальнейших действий при расчете ВКР	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2
8. Разработка плана объекта с предложенным оборудованием	2	-	7	-	4	-	4	-	5	-

9. Оценка эффективности предложенного проекта реакторной установки	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	2	-
10. Составление пояснительной записки	4	-	6	-	4,8	-	4,8	-	6	-
11. Проверка правильности выполнения ГОСТа	2	1	3	1	2,4	1	1,2	0,5	1	1
12. Подготовка к предоставлению проекта и его представление	10	-	20	-	14	-	14	-	17	-

3.4.4 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;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

3.4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

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

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

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

$Ц_i$ – 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 занесены в таблицу 25.

Основные работы для ВКР проводились за рабочей станцией в комнате жилого дома. Время, проведенное за рабочей станцией: 330 часов. Мощность рабочей станции: 0,5 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = Ц_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 5,8 \cdot 0,5 \cdot 330 = 957,$$

где $Ц_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

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

Затраты на электроэнергию составили 957 рублей.

Таблица 25 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Бумага	шт.	100	0,38	38
2. Карандаш	шт.	1	8	8
3. Ластик	шт.	1	10	10
4. Учебная литература	шт.	1	550	550
Итого				606

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование

материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Таблица 26 – Накладные расходы

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z_m), руб.
1. Электроэнергия	кВт·ч	165	5,8	957
2. Печать на листе А4	шт.	100	1,5	150
3. Доступ в интернет	месяц	4	400	1600
Итого			2707	

3.4.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Расчет основной заработной платы включает расчет оплаты руководителя и студента-исполнителя. 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 заработной платы включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

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

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

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

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

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

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_{м} \cdot М}{F_{д}},$$

где $З_{м}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

$М$ – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 48 раб. дней $М=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 27 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Бакалавр
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:

$$З_{м} = З_{тс} \cdot k_p,$$

где $З_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

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

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 28.

Таблица 28 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$З_{тс}$, руб.	k_p	$З_{м}$, руб.	$З_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$З_{осн}$, руб.
Руководитель	7000	1,3	9100	1137,5	8	9100
Бакалавр	9893	1,3	12860,9	532,9	55	29305,5
Итого:						38409,5

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

- оклад – определяется предприятием;
- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей; иные выплаты; районный коэффициент.

3.4.4.3 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:

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

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

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность водится пониженная ставка – 27,10%.

Таблица 29 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель
Основная заработная плата (руководитель), руб.	9100
Основная заработная плата (бакалавр), руб.	29305,5
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271
Итого, руб	10408,97

3.4.4.4 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 30.

Таблица 30 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб
Материальные затраты НТИ	606
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	38409,5
Отчисления во внебюджетные фонды	10408,97
Накладные расходы	5897
Бюджет затрат НТИ	55321,47

3.5 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 76647,59 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).

$$I_{\text{финр}}^{\text{проект}} = \frac{55321,47}{76647,59} = 0,72$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{аналог}} = \frac{76647,59}{76647,59} = 1$$

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 31.

Таблица 31 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

$$I_{\text{проект}} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,25 = 4,35$$

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

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

$$I_{\text{проект}} = \frac{I_{\text{р-проект}}}{I_{\text{финр}}^{\text{проект}}} = \frac{4,35}{0,72} = 6,04 ,$$

$$I_{\text{аналог}} = \frac{I_{\text{р-аналог}}}{I_{\text{финр}}^{\text{аналог}}} = \frac{4,1}{1} = 4,1 .$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 32) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср.п}} = \frac{I_{\text{проект}}}{I_{\text{аналог}}} = \frac{6,04}{4,1} = 1,47$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср.а}} = \frac{I_{\text{аналог}}}{I_{\text{проект}}} = \frac{4,1}{6,04} = 0,69$$

Таблица 32 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Представляемый проект	Аналог
	Интегральный финансовый показатель разработки	0,72	1
	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,35	4,1
	Интегральный показатель эффективности	6,04	4,1

Сравнивая значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что более эффективным вариантом является предоставляемый проект, так как видно значительное удешевление по сравнению с аналогами.

Заключение

Таким образом, были определены параметры конструктивной схемы ячейки и размеры активной зоны, получены значения эффективного коэффициента размножения для холодного и горячего состояний, они равны 1,286 и 1,213, соответственно. Получен спектр плотности потока нейтронов. Получено отрицательное значение ТКР, что обеспечивает саморегулируемость ядерного реактора при повышении температуры и безопасную эксплуатацию. Проведена проверка полученных результатов в WIMS, получен спектр плотности потока нейтронов и определено значение эффективного коэффициента размножения.

Список использованных источников

1. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 №181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07.
2. 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. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988.
4. 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.
5. 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.
6. Физические величины: Справочник /Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
8. Колпаков Г.Н., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах. Часть I: Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 1997.
9. Герасимов В. В., Монахов А. С. Коррозия реакторных материалов. – М. : Изд-во ЦНИИАтоминформ, 1994.
10. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: Учеб. для неэнергетич. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1988. 479 с.
11. Кукин П.П. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств: учеб. Пособие / П.П. Кукин, В.Л. Лапин – М.: Высшая школа, 1999. – 318с.

Приложение А

CELL 6

SEQUENCE 1

NGROUP 26

NMESH 61

NMATERIAL 4 3

NREGION 6

PREOUT

INITIATE

***** *** ***** ***** *****

ANNULUS 1 0.07 0 1

ANNULUS 2 3.945656 1 20

ANNULUS 3 4.412346 2 5

ANNULUS 4 7.000 3 10

ANNULUS 5 7.200 2 5

ANNULUS 6 22.56758 4 20

MESH 1 20 5 10 5 20

MATERIAL 1 -1 350. 1 \$

2235 0.003424875 \$

8238 0.030823876 \$

14 0.034248751

MATERIAL 2 -1 350. 2 \$

2056 0.061152400 \$

52 0.015569200 \$

1058 0.007784610 \$

48 0.000691965 \$

55 0.001297430

MATERIAL 3 -1 350. 3 \$

207 0.0305707000

MATERIAL 4 -1 350. 3 \$

2012 0.085207400

S 32

FEWGROUPS 2,3,4,5,6,8,10,12,13,15,\$

17,18,20,21,23,24,25,27,28,31,33, \$

37,39,47,53,69

BEGINC

BEGINC

Приложение Б

CELL 6

SEQUENCE 1

NGROUP 26

NMESH 61

NMATERIAL 4 3

NREGION 6

PREOUT

INITIATE

***** *** ***** ***** *****

ANNULUS 1 0.07 0 1

ANNULUS 2 3.945656 1 20

ANNULUS 3 4.412346 2 5

ANNULUS 4 7.000 3 10

ANNULUS 5 7.200 2 5

ANNULUS 6 22.56758 4 20

MESH 1 20 5 10 5 20

MATERIAL 1 -1 2100. 1 \$

2235 0.003424875 \$

8238 0.030823876 \$

14 0.034248751

MATERIAL 2 -1 2100. 2 \$

2056 0.061152400 \$

52 0.015569200 \$

1058 0.007784610 \$

48 0.000691965 \$

55 0.001297430

MATERIAL 3 -1 678. 3 \$

207 0.0305707000

MATERIAL 4 -1 678. 3 \$

2012 0.085207400

S 32

FEWGROUPS 2,3,4,5,6,8,10,12,13,15,\$

17,18,20,21,23,24,25,27,28,31,33, \$

37,39,47,53,69

BEGINC

BEGINC