

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

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

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

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Проскурин А.П.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Наймушин А. Г.			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Гоголева Т.С	К. ф. М. Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бычков П. Н.	К. Т. Н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Общекультурные компетенции	
Р 1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
Р 2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
Р 3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
Р 4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
Р 5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р 6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р 7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р 8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны.
Р 9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р 10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Р 11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
Р 12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
Р 13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.
Р 14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
Р 15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ **на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A5B	Проскурину Артему Павловичу

Тема работы:

Нейтронно-физический расчет реактора типа ВВЭР
Утверждена приказом директора (дата, номер) № 1550/с от 27.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(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.).</i>	– тепловая мощность 3000 [МВт]; – ядерное горючее UO_2 ; – обогащение урана 3,3 %; – температура на входе 131 [°C]; – температура на выходе 208 [°C] ; – твэлы стержневые с наружным охлаждением – материалы оболочек твэлов и кассет сплав Э110;
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(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).</i>	– Предварительный расчет; – Нейтронно-физический расчет «холодного» и «горячего» состояния реактора; – многогрупповой расчет; – расчет k_{inf} и длительности кампании в программе WIMS-D5.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	– Презентация; – чертеж ячейки; – спецификация.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение:	Конотопский В. Ю.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и языке:	
Обзор литературы	
Нейтронно-физические параметры критического стационарного ядерного реактора	
Расчет ядерного реактора с помощью программного обеспечения WIMS-D5	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22.04.2019
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Наймушин А. Г.			22.04.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Проскурин Артем Павлович		22.04.2019

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A5B	Проскурин Артем Павлович

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

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	– Тариф на электроэнергию 5,748 р. за 1 кВт·ч.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	– Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %; – Ставка НДС – 20%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Линейный график работ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.04.2019
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский В.Ю	К. Э. Н.		22.04.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Проскурин А. П.		22.04.2019

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0A5B	Проскурин Артем Павлович

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ЯТЦ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.04.19
--	----------

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Проскурин А. П.		

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

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

Форма представления работы:

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
08.05.2019	Выдача задания.	...
13.05.2019	Выбор конструктивной схемы.	...
16.05.2019	Расчет критических параметров проектируемого реактора.	
22.05.2019	Расчет характеристик «горячего» состояния реактора.	
29.05.2019	Расчет ядерного реактора с помощью программного обеспечения WIMS-D5	
01.06.2019	Сдача работы	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Наймушин А. Г.			

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бычков П. Н.	К. Т. Н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 107 с., 26 рис., 28 табл., 30 источников, 4 прил.

Ключевые слова: ядерный реактор, отравление, выгорание, шлакование, воспроизводство, нейтронно-физический расчет, многогрупповой расчет, спектр потоков, ценность нейтронов, нуклидный состав топлива.

Объектом исследования является (ются) ядерный реактор типа ВВЭР

Цель работы – нейтронно-физический и теплогидравлический расчет и определение эксплуатационных параметров реактора.

В процессе исследования проводились расчеты параметров реактора по известным соотношениям и с использованием программного обеспечения

В результате исследования проведен нейтронно-физический расчет одnogрупповым методом по известным соотношениям, и многогрупповым с использованием программного обеспечения, также проведен теплогидравлический расчет

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: реактор типа ВВЭР, тепловая мощность 3000 МВт, ядерное горючее UO_2 , обогащение топлива 3,3%, теплоноситель вода, температуры теплоносителя на входе и выходе 131°C-208°C, материал оболочек и кассет: циркониевый сплав Э110

Степень внедрения: частичная

Область применения: ядерная энергетика

Экономическая эффективность/значимость работы высокая

В будущем планируется работать по данной тематике

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 активной зоне реактора, при работе реактора на полной мощности.

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

АЭС – атомная электростанция;

ЯР – ядерный реактор;

ЯТ – ядерное топливо;

ВВЭР – водо–водяной энергетический реактор;

РБМК – реактор большой мощности канальный

Ак З – активная зона;

МэВ – мегаэлектронвольт;

ТТ – топливная таблетка;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

ТК – технологический канал;

ТЭР – температурный эффект реактивности;

ПД – продукты деления;

ЦРД – цепная реакция деления;

САОЗ – система аварийного охлаждения зоны.

Содержание

Перечень определений.....	11
Обозначения и сокращения.....	12
Введение.....	16
1 Обзор литературы	17
1.1 Реакторные установки типа ВВЭР	17
1.2 Ядерный реактор типа ВВЭР-1000.....	17
1.3 Особенности конструкций реактора ВВЭР	17
1.4 Тепловыделяющие элементы ядерного реактора	19
1.5 Ядерное топливо.....	19
2 Нейтронно-физический расчет	20
2.1 Предварительный тепловой расчет	20
2.2 Расчёт концентраций и сечений	23
2.2.1 Расчёт концентраций	23
2.2.2 Расчёт микро и макросечений.....	24
2.2.3 Гомогенизация первого вида	27
2.2.4 Гомогенизация второго вида.....	28
2.3 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды.....	29
2.3.1 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах.....	30
2.3.2 Вероятность избежать резонансного захвата.....	31
2.3.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов.....	32
2.3.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе	34
2.4 Расчет эффективного коэффициента размножения.....	34
2.5 Оптимизация параметров ячейки	36
2.6 Параметры критического стационарного «горячего» реактора.....	38
2.6.1 Температурные эффекты реактивности.....	38
2.6.2 Зависимость поперечных сечений от температуры.....	39
2.6.3 Коэффициент размножения «горячего» реактора	42
2.7 Расчет в программе WIMS-D5B	43
2.7.1 Расчет «холодного» реактора.....	43

2.7.2 Расчет «горячего» реактора	47
2.7.3 Расчет гомогенного «горячего» реактора	48
2.8 Сравнение полученных данных	50
3 Теплогидравлический расчет	52
3.1 Максимальные значения величин	52
3.2 Расчет значений q_v , q_l и q_s по высоте наиболее энергонапряженной (центральной) кассеты	53
3.3 Расчет температурного состояния и скорости по длине ТК, расход теплоносителя	54
3.4 Расчет коэффициентов теплоотдачи с поверхности ТВЭЛ	57
3.5 Расчет температурного состояния на поверхности ТВЭЛа и ТТ	60
3.6 Распределение температуры в топливной таблетке	61
3.7 Гидравлический расчет ТК	62
3.8 Оценка критических тепловых потоков	64
3.9 Расчет термического напряжения в материалах ТВЭЛОВ и кассет	65
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	68
4.1 Организация и планирование работ	68
4.2 Продолжительность этапов работ	69
4.3 Расчет накопления готовности проекта	73
4.4 Расчет сметы на выполнение проекта	74
4.5 Расчет затрат на материалы	75
4.6 Расчет заработной платы	76
4.7 Расчет затрат на социальный налог	77
4.8 Расчет затрат на электроэнергию	77
4.9 Расчет амортизационных расходов	78
4.10 Расчет прочих расходов	79
4.11 Расчет общей себестоимости разработки	80
4.12 Расчет прибыли	80
4.13 Расчет НДС	80
4.14 Цена разработки ВКР	80
4.15 Оценка экономической эффективности проекта	81

5 Социальная ответственность	82
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	82
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	84
5.2.1 Организационные мероприятия.....	84
5.2.2 Технические мероприятия.....	85
5.3 Условия безопасной работы.....	87
5.4 Электробезопасность	89
5.5 Пожарная и взрывная безопасность	90
Заключение	93
Список использованных источников	95
Приложение А	99
Приложение Б	100
Приложение В.....	101

Введение

В настоящее время, все больше интереса представляет ядерная энергетика. В силу энергоемкости данной отрасли она получила большое внимание всего мира. Для сравнения: для того, чтобы получить количество энергии с деления 1 кг урана 235, потребуется сжечь порядка 10^{16} кг каменного угля.

Важными составляющими дальнейшего развития атомной энергетики являются: строительство новых АЭС и исследование возможности повышения количества вырабатываемой электроэнергии за счет увеличения тепловой мощности реактора.

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

Цель работы: нейтронно-физический и теплогидравлический расчет и определение эксплуатационных параметров реактора.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- предварительный расчет;
- расчет ядерно-физических характеристик «холодного» реактора;
- оптимизация параметров ячейки;
- расчет температурного эффекта реактивности;
- многогрупповой расчет;
- теплогидравлический расчет.

1 Обзор литературы

1.1 Реакторные установки типа ВВЭР

Роль атомных станций играет значительную роль в производстве электроэнергии. В России из числа всех предприятий, которые производят электроэнергию, доля атомных станций составляет 16 %. В нашей стране работают 10 атомных электростанций, которые состоят из 35 энергоблоков [1]. Из них 19 энергоблоков имеют реактор типа ВВЭР. Этот вид реактора корпусного типа; в качестве теплоносителя и замедлителя используется вода с борной кислотой, которая уменьшается в процессе эксплуатации [2].

1.2 Ядерный реактор типа ВВЭР-1000

ВВЭР-1000 — ядерный реактор серии реакторов ВВЭР. Его номинальная электрическая мощность составляет 1000 МВт, тепловая — 3000 МВт. По состоянию на октябрь 2018 года этот реактор является одним из самых распространённых в мире, его доля составляет 7,5 % от общего числа энергетических реакторов всех, эксплуатирующийся во всем мире. Реактор ВВЭР-1000 используется для производства электроэнергии.

Теплоносителем является легкая вода, находящаяся под давлением 16 Мпа. Температура на входе 289 °С, температура на выходе 322 °С, с выхода горячий теплоноситель поступает в парогенератор, где передает свое тепло. Вода в этом реакторе также является замедлителем.

1.3 Особенности конструкций реактора ВВЭР

В верхней части корпуса в располагаются патрубки для подвода и отвода теплоносителя. Вода в активной зоне нагревается за счет тепловыделение ТВЭЛ. Для тепловыделяющих элементов используется топливо – UO_2 , максимальное обогащение которого 5 %. В на данном этапе

развития техники на всех АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 каждая ТВС используется в реакторе в течение трех кампаний, таким образом реализуется трехлетний топливный цикл.

Тепловыделение зависит от реактивности, а её регулирование осуществляется при помощи перемещения ПЭЛ, выполненных в виде стержней, и с помощью ввода бора в воду первого контура и регулирование его концентрации. Жидкостное регулирование компенсирует медленные эффекты изменения реактивности в течение кампании реактора, это его главная задача.

ВВЭР обладает следующими достоинствами:

- удачное использование воды в качестве теплоносителя и замедлителя;
- доступность, а, следовательно, дешевизна воды, а также отработанность технологии по ее получению;
- наличие высокой замедляющей способности, а, следовательно, высокое энерговыделение с единицы объема;
- относительно небольшие габариты реактора и большие удельная и объемная мощности;
- вода как теплоноситель эффективно отводит тепло.

Недостатки реактора типа ВВЭР, обусловленные в основном водой:

- относительно высокое поглощение нейтронов водой, а поэтому должно использоваться только обогащенное топливо;
- возможность неравномерного распределения энерговыделения, из-за сильного замедления нейтронов в воде;
- коррозионная активность воды с конструкционными материалами, что приводит к использованию двуокиси урана и нержавеющей стали, это ухудшает баланс нейтронов увеличивает затраты на эксплуатацию;
- высокое давление при энергетически приемлемых температурах;
- тепловой поток ограничен критическими тепловыми нагрузками.

1.4 Тепловыделяющие элементы ядерного реактора

ТВЭЛ ядерного реактора ВВЭР-1000 – это цилиндрические полые стержни, заполненные таблетками UO_2 . В качестве материала для изготовления трубок ТВЭЛ в настоящее время используется циркониевый сплав Э110. [4].

1.5 Ядерное топливо

Топливом в реакторах ВВЭР-1000 служит диоксид урана [9].

UO_2 имеет следующие свойства:

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

Радиационная стойкость двуокиси урана определяется:

- накоплением продуктов деления, имеющих больший объем, чем разделившиеся атомы;
- рост отдельных зерен в результате выбивания атомов из узлов кристаллической решетки и внедрения в решетку продуктов деления [4];
- образование и рост пор.

2 Нейтронно-физический расчет

2.1 Предварительный тепловой расчет

Расчет реактора на тепловых нейтронах начинается с оценки геометрических параметров АЗ, которые обеспечивали бы безопасную эксплуатацию.

Геометрические параметры АЗ находятся по формулам:

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

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

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

где $V_{a.з}$ – объем, см^3 ;

$D_{a.з}$ – диаметр активной зоны, см;

$H_{a.з}$ – высота активной зоны, см;

N – мощность реактора, МВт;

m – отношение высоты к диаметру;

η – объемный коэффициент увеличения реактора.

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

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

где K_v – объемный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

$\overline{N_0}$ – средняя удельная объемная нагрузка, Вт/см^3 .

Максимальная объемная плотность тепловыделения находится как:

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

где Π_0 – периметр ТВЭЛа, см;

$S_{яч}$ – площадь сечения элементарной ячейки, см^2 .

Средняя скорость теплоносителя в максимально энергонапряженном ТК определяется по выражению:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot P_0 \cdot H_{a.з}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{mn}}, \text{ м/с}, \quad (2.6)$$

где v – скорость теплоносителя;

K_z – осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

S_{mn} – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на тепловыделяющую сборку, см^2 ;

ρ – плотность теплоносителя при рабочей температуре, г/см^3 ;

Δi – разность тепловой энергии, содержащейся в теплоносителе, ккал/кг .

Данная величина определяется по следующей формуле:

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

где C_p – теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{градус})$;

$t_{\text{вых}}, t_{\text{вх}}$ – температура теплоносителя на входе и выходе, $^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2.1 – Входные данные предварительного расчета

Тепловая мощность, МВт	3000
Средняя удельная объемная нагрузка, кВт/л	60
Коэффициент увеличения объема реактора за счёт СУЗ	1,3
Отношение высоты к диаметру	1
Объемный коэффициент неравномерности	3
Осевой коэффициент неравномерности	1,3
Размер ячейки под ключ, см	1,275
Число ТВЭЛОВ в кассете, шт	312
Диаметр ТВЭЛА, см	0,91
Толщина оболочки ТВЭЛА, см	0,07
Диаметр топливной таблетки, см	0,705

Объем активной зоны:

$$V_{a.з} = \frac{N}{N_0} \eta = \frac{3 \cdot 10^9}{60} \cdot 1,3 = 65 \cdot 10^6 \text{ см}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{a.з} = \sqrt[3]{\frac{4V_{a.з}}{\pi m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 65 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 1}} = 435,86 \text{ см}.$$

Высота активной зоны:

$$H_{a.з} = m D_{a.з} = 1 \cdot 4,3586 = 435,86 \text{ см}.$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\max}} = \overline{N_0} \cdot K_v = 60 \cdot 3 = 180 \text{ Вт/см}^3.$$

Периметр тепловыделяющих элементов:

$$\Pi_0 = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 0,91 = 2,8574 \text{ см}.$$

Площадь элементарной ячейки имеет форму шестиугольника и находится по следующей формуле:

$$S_{яч} = \sqrt{3} \frac{r_0^2}{2} = \sqrt{3} \cdot \frac{1,275^2}{2} = 1,407 \text{ см}^2,$$

где r_0 - размер «под ключ» элементарной ячейки

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0_{\max}} \cdot S_{яч}}{116 \cdot \Pi_0} = \frac{180 \cdot 1,407}{116 \cdot 2,8574} = 0,764 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч}.$$

Для определения скорости прокачки теплоносителя необходимо вычислить площадь, приходящуюся на теплоноситель и разность теплосодержания теплоносителя на выходе.

Площадь, приходящаяся на твэл:

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

Площадь теплоносителя:

$$S_{тн} = S_{яч} - S_{твэл} = 0,757 \text{ см}^2.$$

При рабочих параметрах $t=208$ °С и $P=14$ МПа, плотность и теплоемкость теплоносителя составляют $0,865$ г/см³ и 1 ккал/(кг·градус) соответственно. Тогда разность теплосодержания теплоносителя на выходе:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1 \cdot (208 - 131) = 77 \text{ ккал/кг.}$$

Тогда скорость прокачки теплоносителя:

$$v = \frac{q_{\text{max}} \cdot \Pi_0 \cdot H_{a.3}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{ми}}} = \frac{0,764 \cdot 2,8574 \cdot 435,86}{3,6 \cdot 1,3 \cdot 0,865 \cdot 77 \cdot 0,757} = 4,03 \text{ м/с.}$$

2.2 Расчёт концентраций и сечений

2.2.1 Расчёт концентраций

Ядерная концентрация для каждого элемента находится по формуле:

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

где N_A – постоянная Авогадро, моль⁻¹;

ρ – весовая концентрация элемента, г/см³;

A – атомный вес элемента, г/моль;

По заданию топливом является UO_2 с обогащением по U^{235} , равным 3,3%, тогда ядерные концентрации рассчитываются следующим образом:

$$N_{\text{UO}_2} = \frac{N_A \cdot \rho_{\text{UO}_2}}{A_{\text{UO}_2}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,5}{269,928} = 2,34 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{\text{U}^{235}} = N_{\text{UO}_2} \cdot c = 2,34 \cdot 10^{22} \cdot 0,033 = 7,722 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3},$$

где c – обогащение по U^{235} ;

$$N_{\text{U}^{238}} = N_{\text{UO}_2} \cdot (1 - c) = 2,34 \cdot 10^{22} \cdot (1 - 0,033) = 2,26 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{\text{O}}(\text{топливо}) = 2 \cdot N_{\text{UO}_2} = 4,69 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

В качестве оболочки твэла используется циркониевый сплав Э110. Его состав: цирконий – 99%, ниобий – 1%. Рассчитаем концентрации каждого компонента сплава:

$$N_{Zr} = C_{Zr} \cdot \frac{N_A \cdot \rho_{сплав}}{A_{сплав}} = 0,99 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 6,57}{91} = 43,0452 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{Nb} = C_{Nb} \cdot \frac{N_A \cdot \rho_{сплав}}{A_{сплав}} = 0,01 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 6,57}{91} = 43,48 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Теплоносителем-замедлителем является легкая вода:

$$N_{H_2O} = \frac{N_A \cdot \rho_{H_2O}}{A_{H_2O}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,865}{18} = 2,894 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3};$$

$$N_O (\text{теплоноситель}) = N_{H_2O} = 2,894 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3};$$

$$N_H = 2 \cdot N_{H_2O} = 5,789 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

2.2.2 Расчёт микро и макросечений

Для определения сечений деления и поглощения, пользуются формулами:

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

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

где σ_a, σ_f – табличные значения сечений, барн;

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

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

Температура нейтронного газа принята равной $T_{н.г} = 400$ К. При таком значении температуры, поправочный коэффициент равен $f_f = 0,96$ и $f_a = 0,96$ для делящихся нуклидов и $f_a = 1$ для неделящихся нуклидов.

Макроскопические сечения вычисляются по формуле:

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

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

Микро и макросечения для U^{235} :

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

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

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

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

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 422,71 \cdot 10^{-24} \cdot 7,722 \cdot 10^{20} = 0,326 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 496,07 \cdot 10^{-24} \cdot 7,722 \cdot 10^{20} = 0,383 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 7,722 \cdot 10^{20} = 11,583 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 511,07 \cdot 10^{-24} \cdot 7,722 \cdot 10^{20} = 0,395 \text{ см}^{-1}.$$

Микро и макросечения для U^{238} :

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 2,05 \text{ барн};$$

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

$$\sigma_{tr}^{U^{238}} = \sigma_a^{U^{238}} + \sigma_s^{U^{238}} (1 - \mu_s) = 2,05 + 9(1 - 0) = 11,05 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{U^{238}} = 2,05 \cdot 10^{-24} \cdot 2,26 \cdot 10^{22} = 4,633 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{238}} = 9 \cdot 10^{-24} \cdot 2,26 \cdot 10^{22} = 20,34 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{238}} = 11,05 \cdot 10^{-24} \cdot 2,26 \cdot 10^{22} = 24,97 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

Микро и макросечения для O_2 в топливе:

$$\sigma_s^{O_2} = 3,75 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{O_2} = \sigma_a^{O_2} + \sigma_s^{O_2} (1 - \mu_s) = 0 + 3,75(1 - 0,04) = 3,6 \text{ барн};$$

$$\Sigma_s^{O_2} = 3,75 \cdot 10^{-24} \cdot 4,68 \cdot 10^{22} = 0,175 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{O_2} = 3,6 \cdot 10^{-24} \cdot 4,68 \cdot 10^{22} = 0,169 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для UO_2 :

$$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U^{235}} + \Sigma_a^{U^{238}} + \Sigma_a^{O_2} = 0,383 + 0,04633 + 0 = 0,429 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{UO_2} = \Sigma_f^{U^{235}} = 0,326 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{UO_2} = \Sigma_s^{U^{235}} + \Sigma_s^{U^{238}} + \Sigma_s^{O_2} = 0,011583 + 0,2034 + 0,175 = 0,38998 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{UO_2} = \Sigma_{tr}^{U^{235}} + \Sigma_{tr}^{U^{238}} + \Sigma_{tr}^{O_2} = 0,395 + 0,2497 + 0,169 = 0,8137 \text{ см}^{-1}.$$

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

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

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

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

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

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 11,583 \cdot 10^{-3} = 9,834 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

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

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

$$\xi \Sigma_s^{U^{238}} = 8,38 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2034 = 1,704 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для O_2 :

$$\xi^{O_2} = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0,12;$$

$$\xi \Sigma_s^{O_2} = 0,12 \cdot 0,176 = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для UO_2 :

$$\xi^{UO_2} = \frac{\sum \xi \Sigma}{\sum \Sigma} = \frac{\xi \Sigma^{U^{235}} + \xi \Sigma^{U^{238}} + \xi \Sigma^{O_2}}{\Sigma^{U^{235}} + \Sigma^{U^{238}} + \Sigma^{O_2}} = \frac{9,834 \cdot 10^{-5} + 1,704 \cdot 10^{-3} + 2,1 \cdot 10^{-2}}{11,583 \cdot 10^{-3} + 0,2034 + 0,176} = 5,832 \cdot 10^{-2};$$

$$\xi \Sigma_s^{UO_2} = 5,832 \cdot 10^{-2} \cdot 0,38998 = 2,274 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

Значения микро и макросечений и замедляющие способности для остальных элементов активной зоны (оболочка твэлов, теплоноситель-замедлитель) представлены в приложении А.

2.2.3 Гомогенизация первого вида

В данном случае необходимо представить элементарную ячейку в виде однородной гомогенизированной смеси. Эскиз данной ячейки изображен на рисунке 2.1

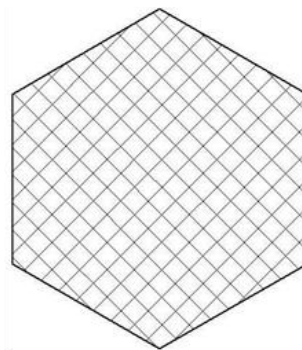


Рисунок 2.1 – Элементарная ячейка после гомогенизации первого вида

Ядерные концентрации гомогенизированных элементов находятся по следующей формуле:

$$N_i^{z1} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{яч}}, [\text{ядер/см}^3], \quad (2.14)$$

где N_i – гетерогенная ядерная концентрация i -го элемента, ядер/см³;
 S_i – площадь сечения i -го элемента в элементарной ячейки, см²;

Рассчитаем площади сечения недостающих элементов:

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

$$S_{об} = \pi(R_{твэл}^2 - r_{об}^2) = 3,14 \cdot (0,455^2 - 0,39^2) = 0,172 \text{ см}^2;$$

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

$$S_{зам} = S_{яч} - S_{мон} - S_{об} - S_{He} = 1,408 - 0,43 - 0,172 - 0,048 = 0,758 \text{ см}^2.$$

Непосредственно сами значения макросечений для данного вида гомогенизации представлены в приложении Б.

2.2.4 Гомогенизация второго вида

В данном случае необходимо разделить гетерогенную элементарную ячейку на две гомогенизированных зоны: замедлитель и фиктивный блок. Эскиз данной конфигурации ячейки представлен на рисунке 2.2.

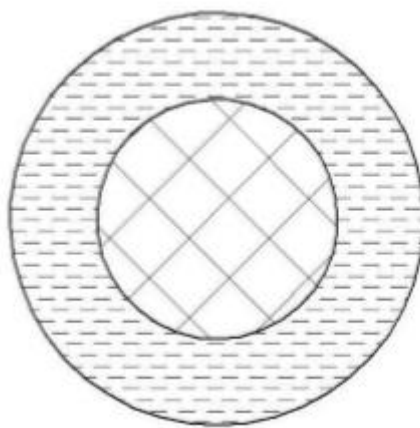


Рисунок 2.2 – Эскиз элементарной ячейки после гомогенизации второго вида

Ядерные концентрации нуклидов замедлителя остаются неизменными, по сравнению, с гетерогенной ячейкой:

$$N_i^{c2} = N_i. \quad (2.15)$$

Ядерные концентрации нуклидов фиктивного блока рассчитываются по следующей формуле:

$$N_i^{c2} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{\text{мезл}}}, [\text{ядер/см}^3]. \quad (2.16)$$

Непосредственно сами значения макросечений для данного вида гомогенизации представлены в приложении Б.

2.3 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется формулой:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta, \quad (2.17)$$

где φ – доля нейтронов, избежавших резонансного захвата;

μ – доля нейтронов, вышедших с деления на быстрых нейтронах;

θ – доля нейтронов, вышедших с деления тепловыми нейтронами;

η – количество нейтронов с одного поглощенного в топливе.

2.3.1 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах зависит от геометрических параметров расположения ТВЭЛов в активной зоне, от уран-водного соотношения (для ВВЭР), но при расчете μ для стержневых ТВЭЛ можно воспользоваться формулой:

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

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

Значение P определяется по рисунку 2.3:

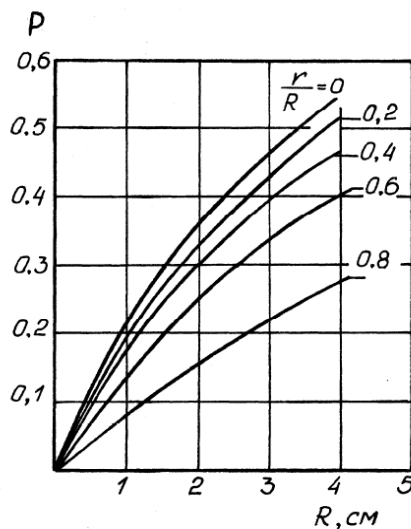


Рисунок 2.3 – График вероятности столкновения быстрого нейтрона с ядром U^{238}

При соотношении $\frac{r}{R} = 0,17 \approx 0,2$ и радиусе топлива 0,705 см, величина $P=0,1$.

Тогда коэффициент размножения на быстрых нейтронах:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} = 1,00925.$$

2.3.2 Вероятность избежать резонансного захвата

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

$$\varphi = \exp\left(-\frac{k_T \cdot R_{UO_2} \cdot \sqrt{R_{мезл}} \cdot \varepsilon + 0,73 \cdot R_{UO_2}^2 \cdot \varepsilon}{\xi \Sigma_S^{H_2O} \cdot S_{зам} + \xi \Sigma_S^{\phi,6} \cdot S_{\phi}}\right), \quad (2.19)$$

где k_T – температурный коэффициент;

ε – пористость по U^{238} .

Температурный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_U}), \quad (2.20)$$

где T_U – температура топлива.

Пористость по U^{238} определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{N^{U^{238}}}{N_0^{U^{238}}}, \quad (2.21)$$

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

$N^{U^{238}}$ – концентрация U^{238} в топливе.

Температурный коэффициент:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{293}) = 1,00715.$$

Пористость по U^{238} :

$$\varepsilon = \frac{2,26 \cdot 10^{22} \cdot 238}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,973 \cdot 19,5} = 0,476.$$

Тогда вероятность избежать резонансного захвата:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{1,0072 \cdot 0,3765 \cdot \sqrt{0,455 \cdot 0,482} + 0,73 \cdot 0,3525^2 \cdot 0,482}{1,168 \cdot 0,758 + 0,0173 \cdot 0,650}\right) = 0,791.$$

2.3.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов

Расчет θ пройдет в два этапа. Определяется величина θ'_ϕ - доля тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке. Затем определяется θ_0 - коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\sum a_{мон.}}{\sum a_\phi}. \quad (2.22)$$

Величина θ'_ϕ , определяется по формуле:

$$\frac{1}{\theta'_\phi} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \sum a_{зам}}{S_\phi \cdot \sum a_\phi} + (E - 1), \quad (2.23)$$

где F – коэффициент экранирования;

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

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования равен:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_\phi}{L_\phi} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}{I_1\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}, \quad (2.24)$$

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

L_ϕ – длина диффузии в фиктивном блоке.

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E - 1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}}\right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{зам}}{L_\phi} - 0,75\right). \quad (2.25)$$

Длина диффузии:

$$L_{\partial u \phi} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr} \cdot \Sigma_a}}. \quad (2.26)$$

$$L_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr\phi} \cdot \Sigma_{a\phi}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,637 \cdot 0,291}} = 1,341 \text{ см};$$

$$L_{зам} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr_{зам}} \cdot \Sigma_{a_{зам}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 1,998 \cdot 0,019}} = 2,954 \text{ см}.$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{зам}}{L_{\phi}} - 0,75 \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{0,67}{2,954} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{0,67}{1,341} - 0,75 \right) = -0,009.$$

Коэффициент экранирования:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} \cdot \frac{I_0 \left(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} \right)}{I_1 \left(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} \right)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,455}{1,341} \cdot \frac{I_0 \left(\frac{0,455}{1,341} \right)}{I_1 \left(\frac{0,455}{1,341} \right)} = 1,0143.$$

Тогда доля тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке:

$$\frac{1}{\theta'_{\phi}} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \Sigma_{a_{зам}}}{S_{\phi} \cdot \Sigma_{a_{\phi}}} + (E-1) = 1 + 1,0143 \cdot \frac{0,758 \cdot 0,019}{0,65 \cdot 0,291} - 0,009 = 1,068;$$

$$\theta'_{\phi} = 0,936.$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{a_{мон}}}{\Sigma_{a_{\phi}}} = \frac{0,289}{0,291} = 0,993.$$

Тогда коэффициент использования тепловых нейтронов:

$$\theta = \theta_0 \cdot \theta'_{\phi} = 0,993 \cdot 0,936 = 0,929.$$

2.3.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе

η показывает число вторичных нейтронов, приходящихся на один тепловой нейтрон, поглощенный топливом и вызвавший деление.

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\sum f_{mon}}{\sum a_{mon}}, \quad (2.27)$$

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

Тогда:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\sum f_{mon}}{\sum a_{mon}} = 2,42 \cdot \frac{0,328}{0,43} = 1,847.$$

Тогда коэффициент размножения в бесконечной среде:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta = 1,00925 \cdot 0,791 \cdot 0,929 \cdot 1,847 = 1,372.$$

2.4 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения нейтронов находится по формуле:

$$k_{эфф} = k_{\infty} \cdot P = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2}, \quad (2.28)$$

где B^2 – геометрический параметр;

τ_p – возраст нейтронов;

P – вероятность избежать утечки.

Квадрат длины диффузии отражателя с учетом гетерогенности:

$$L_p^2 = L_{зам}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{ф.б.}^2 \cdot \theta; \quad (2.29)$$

$$L_p^2 = 2,954^2 \cdot (1 - 0,929) + 1,341^2 \cdot 0,929 = 2,288 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов с учётом всех элементов ячейки:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^2; \quad (2.30)$$

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^2 = 27,3 \cdot \left(\frac{1,408}{0,758} \right)^2 = 37,21 \text{ см}^2.$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta} \right)^2, \quad (2.31)$$

где δ –эффективная добавка за счет отражателя.

Эффективная добавка за счет отражателя для водо-водяных реакторов с водным отражателем:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40), \quad (2.32)$$

где M –длина миграции нейтронов в отражателе.

Длина миграции:

$$M = \sqrt{L_{H_2O}^2 + \tau_{H_2O}}; \quad (2.33)$$

$$M = \sqrt{8,727 + 27,3} = 6,0022 \text{ см}.$$

Тогда эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (6,022^2 - 40) = 6,803 \text{ см}.$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta} \right)^2 = \left(\frac{\pi}{435,8 + 2 \cdot 6,802} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{217,93 + 6,802} \right)^2 = 1,63 \cdot 10^{-4}.$$

Тогда эффективный коэффициент размножения:

$$k_{эфф} = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2} = 1,360 \cdot \frac{\exp(-1,63 \cdot 10^{-4} \cdot 37,21)}{1 + 1,63 \cdot 10^{-4} \cdot 2,288} = 1,361.$$

2.5 Оптимизация параметров ячейки

После расчета k_{∞} необходимо подобрать такие параметры ячейки, при которых данный коэффициент будем максимальным. В некоторых диапазонах варьировались шаг расстановки твэлов и радиус топливного блока. Полученные зависимости изображены на рисунках 2.4 и 2.5 соответственно.

Таблица 2.2 – Зависимость бесконечного коэффициента размножения от шага решетки

Шаг решетки, $h_{яч}$, см	k_{∞}
1,275	1,372
1,4	1,422
1,5	1,434
1,6	1,431
1,7	1,417

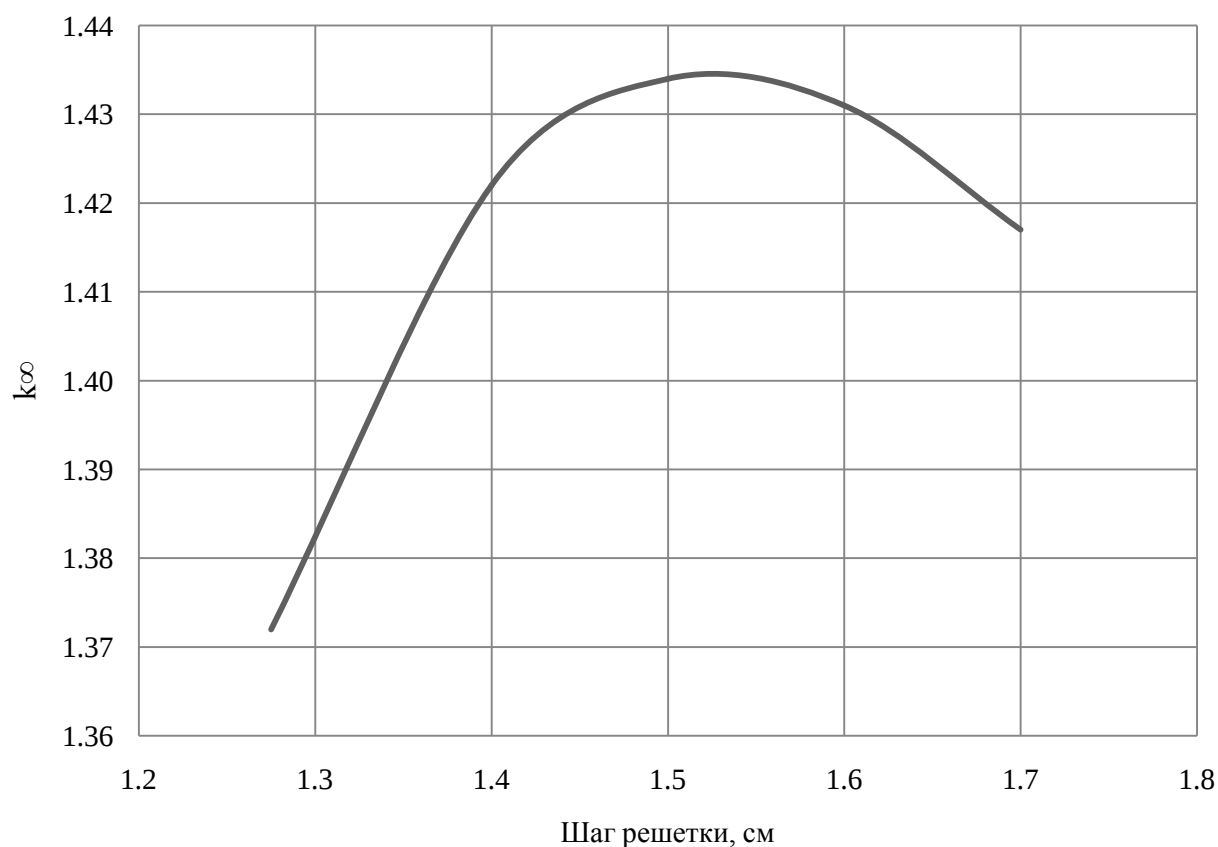


Рисунок 2.4 – Зависимость k_{∞} от шага расстановки ТВЭЛОВ

Таблица 2.3 – Зависимость бесконечного коэффициента размножения от радиуса ТВЭла

Радиус ТВЭла, $R_{\text{топ}}$, см	k_{∞}
0,7	0,832
0,65	1,116
0,6	1,285
0,55	1,382
0,5	1,429
0,46	1,435
0,455	1,434
0,45	1,432
0,4	1,392
0,35	1,299
0,3	1,138
0,25	0,883

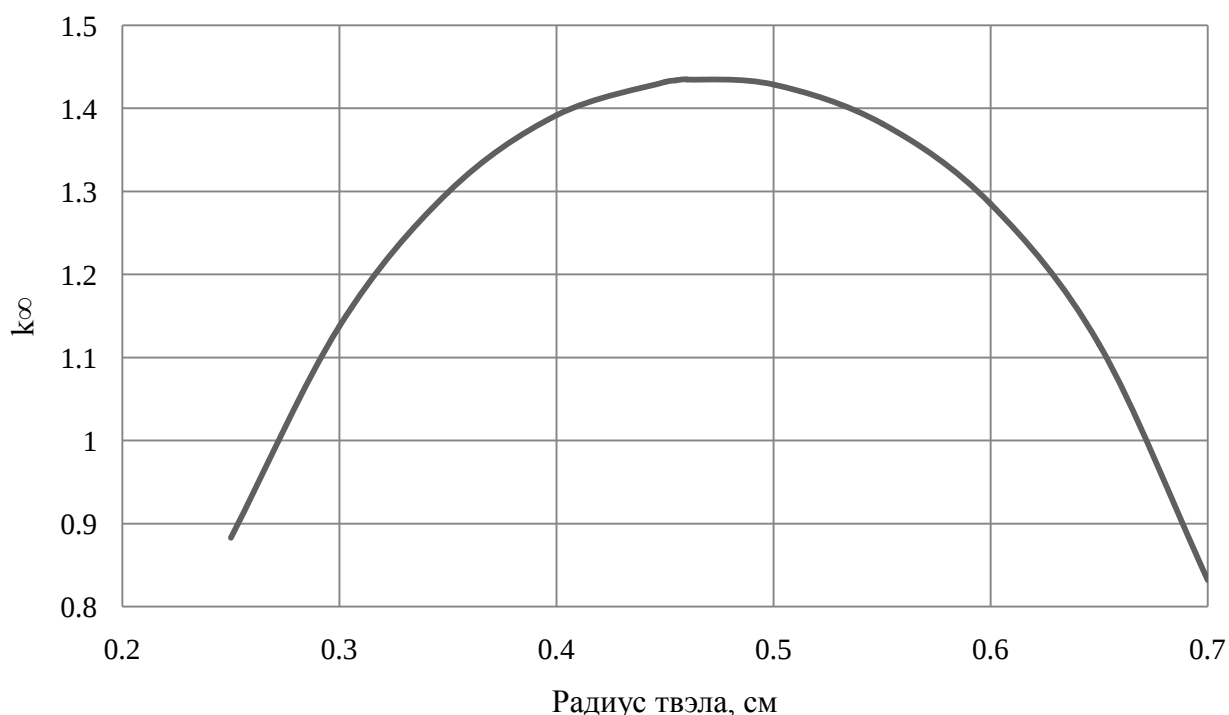


Рисунок 2.5 – Зависимость k_{∞} от радиуса твэла

Максимальное $k_{\infty}=1,434$ при $h_{\text{яч}}=1,526$ см. Далее при данном $h_{\text{яч}}=1,434$ см варьировался радиус топливного блока. Максимальное $k_{\infty}=1,436$ при $R_{\text{топ}}=0,473$ см.

После анализа полученных зависимостей было выбрано оптимальное значение $k_{\infty}=1,436$ при $R_{\text{топ}}=0,473$ см, $h_{\text{яч}}=1,526$ см, $v=3,2$ м/с.

Но для реактора ВВЭР-1000 не рекомендуется брать шаг решетки больше, чем 1,275 см, так как это приведет к уменьшению массы загружаемого топлива, а это отрицательно сказывается на работе ядерного реактора, в частности уменьшается длина компании топлива.

2.6 Параметры критического стационарного «горячего» реактора

2.6.1 Температурные эффекты реактивности

При выводе реактора на номинальную мощность повышается температура всех его компонентов.

Повышение температуры влечет за собой уменьшение поперечного сечения нейтронных реакций разного рода вследствие увеличения скорости нейтронов. Также в силу уменьшения плотности материалов уменьшаются макроскопические сечения. Повышение температуры ядерного горючего приводит к уширению резонансов горючего вследствие их теплового движения.

Все эти эффекты называются температурными эффектами реактивности.

2.6.2 Зависимость поперечных сечений от температуры

Для определения поперечных сечений материалов «горячего» реактора, необходимо найти температуру нейтронного газа при рабочей температуре реактора и в соответствии с этой температурой пересчитать нейтронно-физические параметры реактора. При определении температуры нейтронного газа можно принимать температуру замедлителя равной средней температуре теплоносителя. Тогда эффективная температура нейтронного газа вычисляется следующим образом:

$$T_{эф}^{н.г} = T_{зам} \left(1 + 1,4 \frac{\Sigma_{аяч}}{\xi \Sigma_{сяч}} \right), \quad (2.34)$$

$$\text{где } T_{зам} = \frac{T_{тепвых} + T_{тепвх}}{2} = 443 \text{ К.}$$

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

$$\xi \Sigma_{сяч} = \frac{\xi \Sigma_{s,mon} \cdot S_{mon} + \xi \Sigma_{s,men} \cdot S_{men} + \xi \Sigma_{s,об} \cdot S_{об}}{S_{фб}} = 1,185 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{аяч} = \frac{\Sigma_{a,mon} \cdot S_{mon} + \Sigma_{a,men} \cdot S_{men} + \Sigma_{a,об} \cdot S_{об}}{S_{фб}} = 0,271 \text{ см}^{-1}.$$

Тогда, отношение равно:

$$\frac{\Sigma_{аяч}}{\xi \Sigma_{сяч}} = \frac{0,111}{0,634} = 0,2287 \text{ см}^{-1}.$$

При этом, температура нейтронного газа:

$$T_{эф}^{н.э} = 443 \cdot (1 + 1,4 \cdot 0,2287) = 584 \text{ К.}$$

Зная температуру нейтронного газа, определяем по таблице $f(T_{н.э.})$:

$$f(T_{н.э.}) = 0,94$$

Необходимо знать верхнюю границу тепловой группы. Для тепловых и не очень жестких промежуточных нейтронов границей тепловой группы условно считается точка пересечения спектров Ферми и Максвелла. Эта точка определяется через трансцендентное уравнение:

$$\frac{\chi_{zp}^2 \cdot \exp(-\chi_{zp})}{1 - (1 + \chi_{zp}) \cdot \exp(-\chi_{zp})} = \frac{\Sigma_{аяч}}{\xi \Sigma_{сяч}}, \quad (2.35)$$

$$\text{где } \chi_{zp} = \frac{E_{zp}}{E_T}.$$

Из уравнения 2.35 было определено значение $\chi_{zp} = 4,575$. Используя график функции $F(\chi_{zp})$, представленный на рисунке 2.6, было определено значение F , которое составило 1,07.

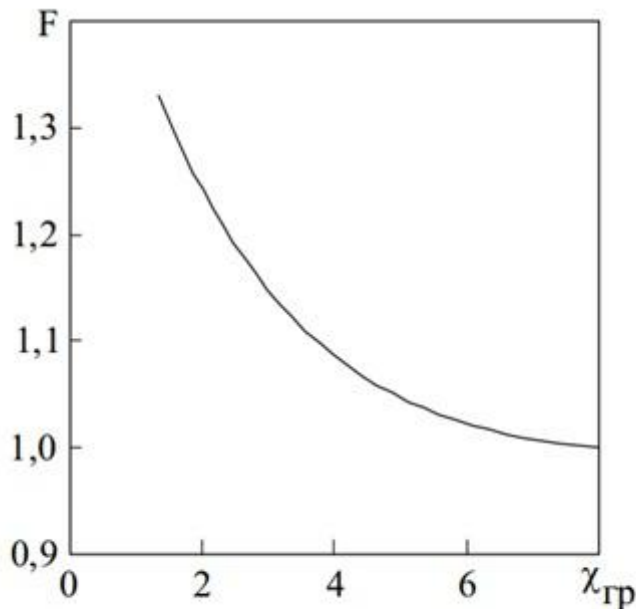


Рисунок 2.6 – Графики функции $F(\chi_{гр})$

С учетом определённых значений необходимо вычислить изменение сечений:

$$\bar{\sigma}_{f,a} = \sigma_{f_0,a_0} \cdot 0,884 \cdot f(\chi_{zp}) \cdot F(\chi_{zp}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}, \quad (2.36)$$

где $f(T_{н.г.}) = 0,94$, $F(\chi_{zp}) = 1,07$.

После пересчета сечений, отношение макроскопического сечения поглощения к замедляющей способности изменится, ввиду изменения микросечения поглощения, следовательно, измениться $\chi_{гр}$ и температура нейтронного газа, что повлечёт изменение $F(\chi_{гр})$ и $f(T_{н.г.})$. Необходимо учитывать изменения и пересчитывать сечения до тех пор, пока изменения перестанут быть существенными. В таблице 2.4 представлены значения микроскопических и макроскопических сечений поглощения и деления материалов для установившегося значения $\chi_{гр}$, при рабочей температуре.

Таблица 2.4 – Микроскопические и макроскопический сечения поглощения и деления при рабочей температуре.

Материал	Микроскопическое сечение		Макроскопическое сечение	
	$\bar{\sigma}_f$, барн	$\bar{\sigma}_a$, барн	Σ_f см ⁻¹	Σ_a , см ⁻¹
U ²³⁵	367,405	431,164	0,19	0,217
U ²³⁸	0	1,71	0	0,0336
O ₂	0	0	0	0
H ₂ O	0	0,01029	0	0,0191
Zr	0	0,12	0	0,0017
Nb	0	0,779	0	0,0001

2.6.3 Коэффициент размножения «горячего» реактора

Ввиду изменения сечений, необходимо учесть изменения коэффициентов формулы четырех сомножителей. В таблице 2.5 значения коэффициентов формулы четырех сомножителей.

Таблица 2.5 – Значения коэффициентов формулы четырёх сомножителей для «холодного» и «горячего» состояния.

Коэффициент	Значение в «холодном» реакторе	Значение в «горячем» реакторе	Изменение значения
φ	0,791	0,791	0
μ	1,0097	1,0097	0
θ	0,9294	0,9191	0,0103
η	1,847	1,847	0
k_{∞}	1,3715	1,3563	0,0152

Эффективный коэффициент размножения «горячего» реактора определяется по формуле:

$$k_{\text{эфф}}^{\text{гор}} = k_{\infty}^{\text{гор}} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_{\text{гор}})}{1 + B^2 L_{\text{гор}}^2}; \quad (2.37)$$

Возраст нейтронов для «горячего» реактора вычисляется следующим образом:

$$\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{хол}} - \frac{1}{3 \cdot \xi \Sigma_{\text{сяч}} \cdot \Sigma_{\text{тр}} \cdot \Sigma_{\text{тр}} \cdot \Sigma_{\text{тр}}} \cdot \ln \frac{T_{\text{н.э}}}{293}. \quad (2.38)$$

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

$$L_{\text{зам}}^2 = L_{\text{зам}}^2(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,48}. \quad (2.39)$$

Пересчитывая значения τ и L^2 для «горячего» состояния, получаем эффективный коэффициент размножения для «горячего» реактора:

$$k_{эф}^{гор} = 1,3563 \cdot \frac{\exp(-1,63 \cdot 10^{-4} \cdot 37,1359)}{1 + 1,63 \cdot 10^{-4} \cdot 10,4191} = 1,3504;$$

Определим температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \frac{k_{эф}^{гор} - 1}{k_{эф}^{гор}} - \frac{k_{эф}^{хол} - 1}{k_{эф}^{хол}} = -0,0057;$$

Температурный коэффициент реактивности:

$$\alpha = \frac{\rho_{гор} - \rho_{хол}}{\Delta T} = \frac{-0,0059}{443 - 293} = -3,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1};$$

2.7 Расчет в программе WIMS-D5B

2.7.1 Расчет «холодного» реактора

Для расчёта элементарной ячейки реактора типа ВВЭР была создана модель, состоящая из твэла и окруженного теплоносителя-замедлителя, форма была переделана с шестиугольной призмы в цилиндр.

Расчет бесконечного коэффициента размножения нейтронов для «холодного» реактора в программе дал результат $k_{\infty}=1,4332$

Температура всех материалов, входящих в состав расчётной модели, для «холодной» ячейки имеют температуру 293 К. На рисунке 2.7 представлена зависимость запаса реактивности(ρ) от энерговыработки.

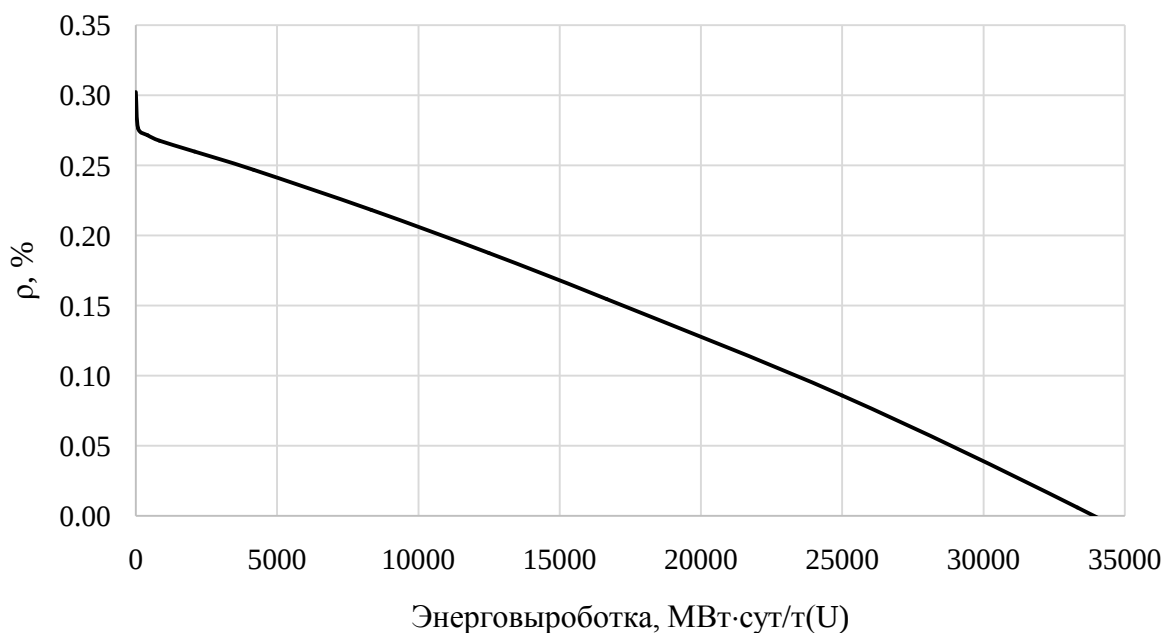


Рисунок 2.7 – Зависимость запаса реактивности от энерговыработки

Из полученного графика видно, что при энерговыработке около 34000 МВт·сут/т(U) ячейка израсходовала весь запас реактивности.

Очевидно, что в процессе кампании происходит выгорание делящегося нуклида U^{235} и накопление изотопов Pu, которые в свою очередь являются делящимися. На рисунках 2.8-2.12 представлена зависимость ядерной концентрации от энерговыработки следующих нуклидов: U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} и Pu^{241} соответственно.

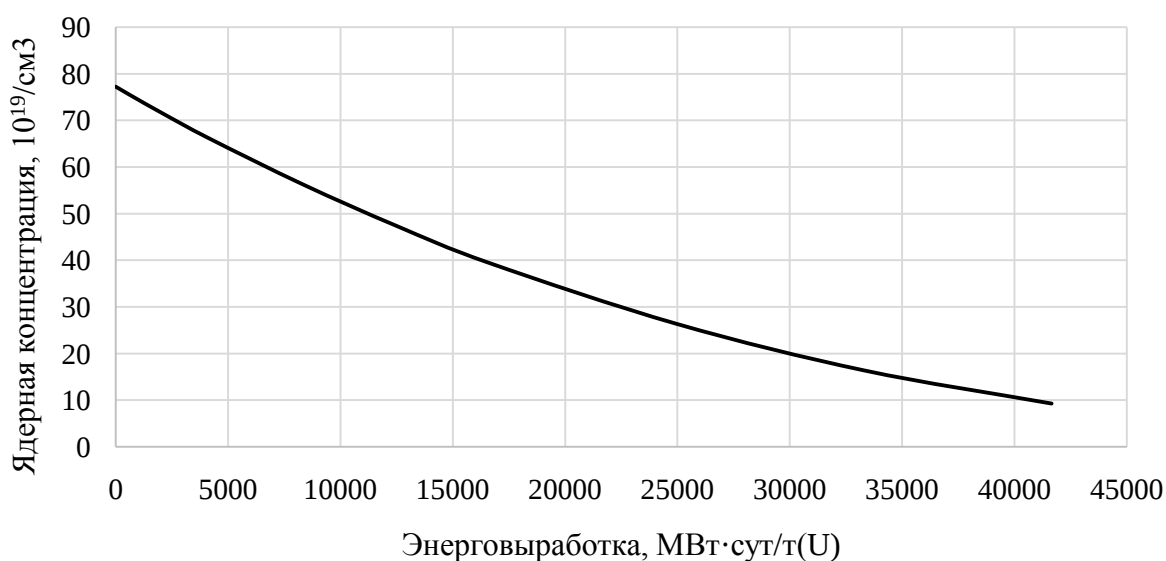


Рисунок 2.8 – Изменение концентрации U^{235} от энерговыработки

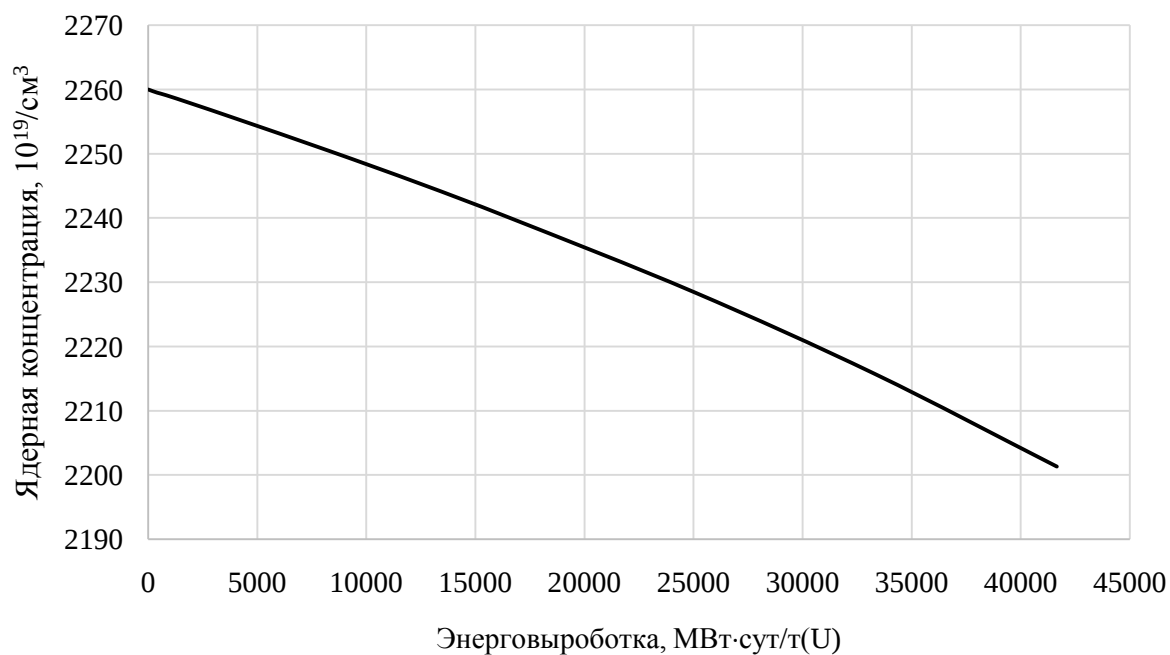


Рисунок 2.9 – Зависимость концентрации U^{238} от энергосинтеза

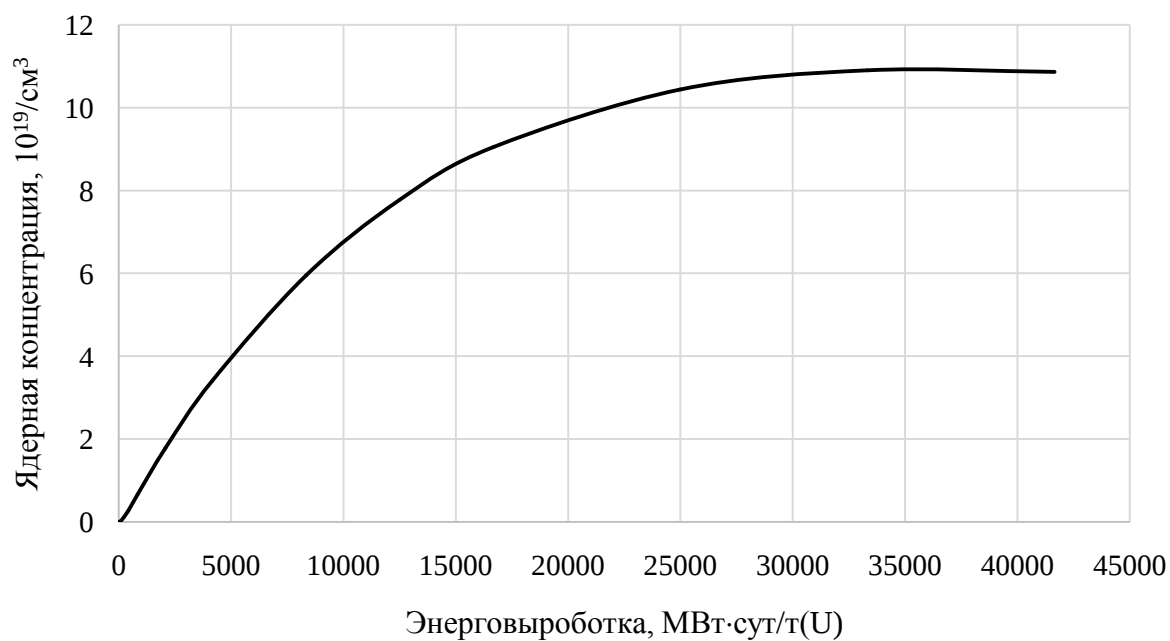


Рисунок 2.10 – Зависимость концентрации Pu^{239} от энергосинтеза

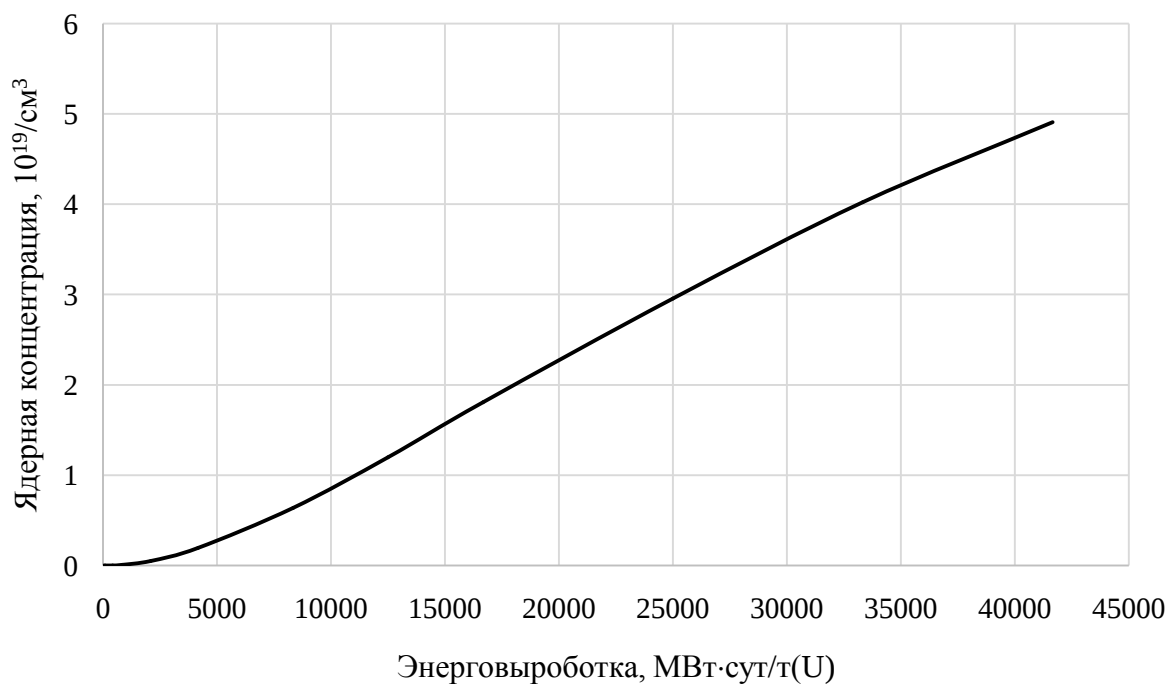


Рисунок 2.11 – Зависимость концентрации Pu^{240} от энерговыработки

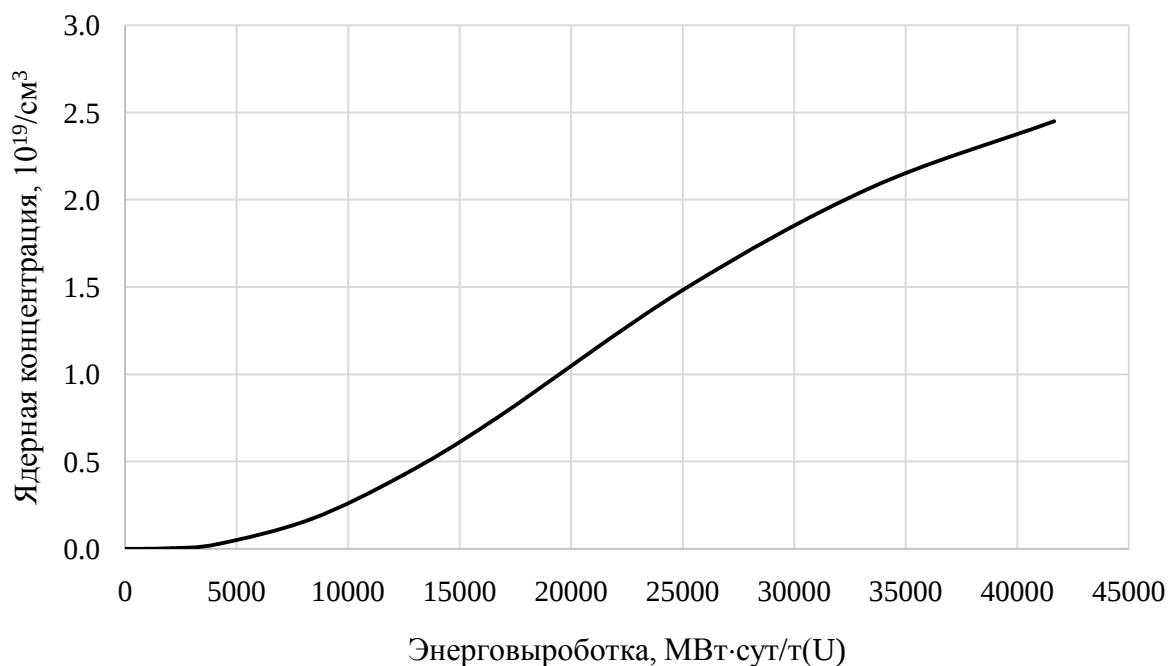


Рисунок 2.12 – Зависимость концентрации Pu^{241} от энерговыработки

Из графиков видно, что концентрации нуклидов U^{235} и U^{238} снижаются в ходе кампании. Это связано с делением первого и радиационным захватом второго. Для изотопов Pu наблюдается обратная картина: все его изотопы накапливаются в ходе кампании. Это связано с тем, что нуклид U^{238} при захвате нейтрона претерпевает β^- , переходя в нуклид Pu^{239} . Дальнейший захват

нейтрона нуклидом Pu^{239} может приводить к увеличению атомной массы, что мы и наблюдаем.

2.7.2 Расчет «горячего» реактора

Чтобы понять, как реактор ведёт себя при разогреве, необходимо произвести расчёт при рабочей температуре. Для этого были определены следующие температуры: температура топлива – 1300 К, температура оболочки – 443 К, температура теплоносителя и замедлителя – 443 К. Плотность теплоносителя при рабочей температуре равна $0,865 \text{ г/см}^3$. Геометрия расчётной модели не претерпела никаких изменений. На рисунке 2.13 представлена зависимость запаса реактивности от энерговыработки.

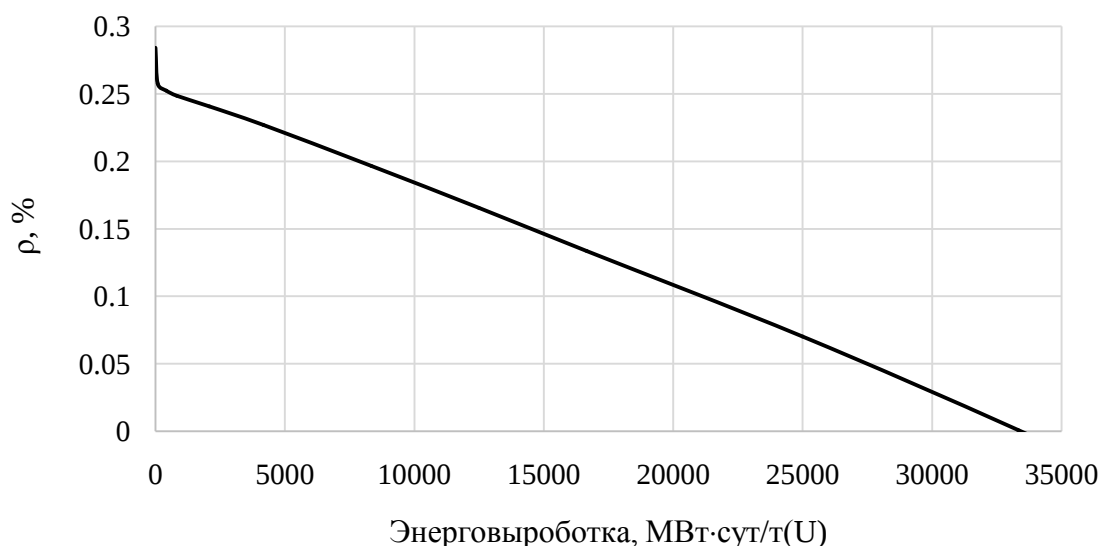


Рисунок 2.13 – Зависимость реактивности «горячего» реактора от энерговыработки

Из графика видно, что максимальная энерговыработка не сильно отличается от «холодного» расчета.

Расчет бесконечного коэффициента размножения нейтронов для «горячего» реактора в программе дал результат $k_{\infty}=1,3964$

Используя полученные значения реактивности для «холодного» и «горячего» реакторов был определен температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \rho_{гор} - \rho_{хол} = -1,8 \%$$

2.7.3 Расчет гомогенного «горячего» реактора

Для расчёта использовалась двузонная модель, первая из которых содержит топливо и оболочку с гомогенными концентрациями, а вторая является теплоносителем-замедлителем, окружающим фиктивный блок. На рисунке 2.14 представлена зависимость запаса реактивности от энерговыработки.

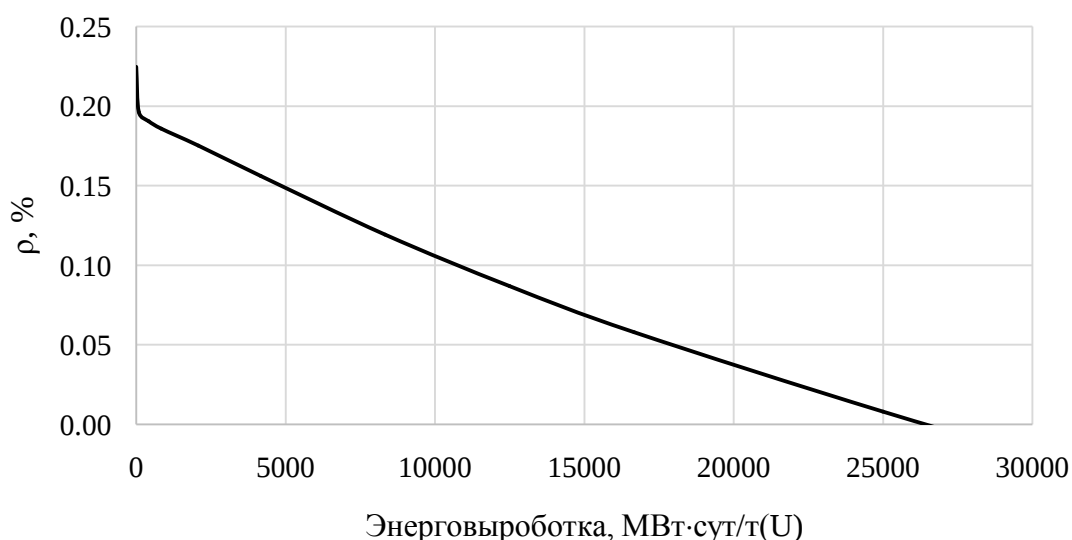


Рисунок 2.14 – Зависимость реактивности гомогенного «горячего» реактора от энерговыработки

Очевидно, что гомогенизация приводит к изменению запаса реактивности, т.к. значительно меняются коэффициенты формулы четырёх сомножителей. Анализируя график, можно увидеть, что максимальная энерговыработка составила около 27000 МВт·сут/т(U).

Одно из преимуществ гомогенной ячейки заключается в том, что она позволяет на качественном уровне определить распределение плотности потока быстрых и тепловых нейтронов и энерговыделения в зависимости от радиуса расчётной модели.

На рисунке 2.15 представлено распределение быстрых и тепловых нейтронов по радиусу элементарной ячейки.

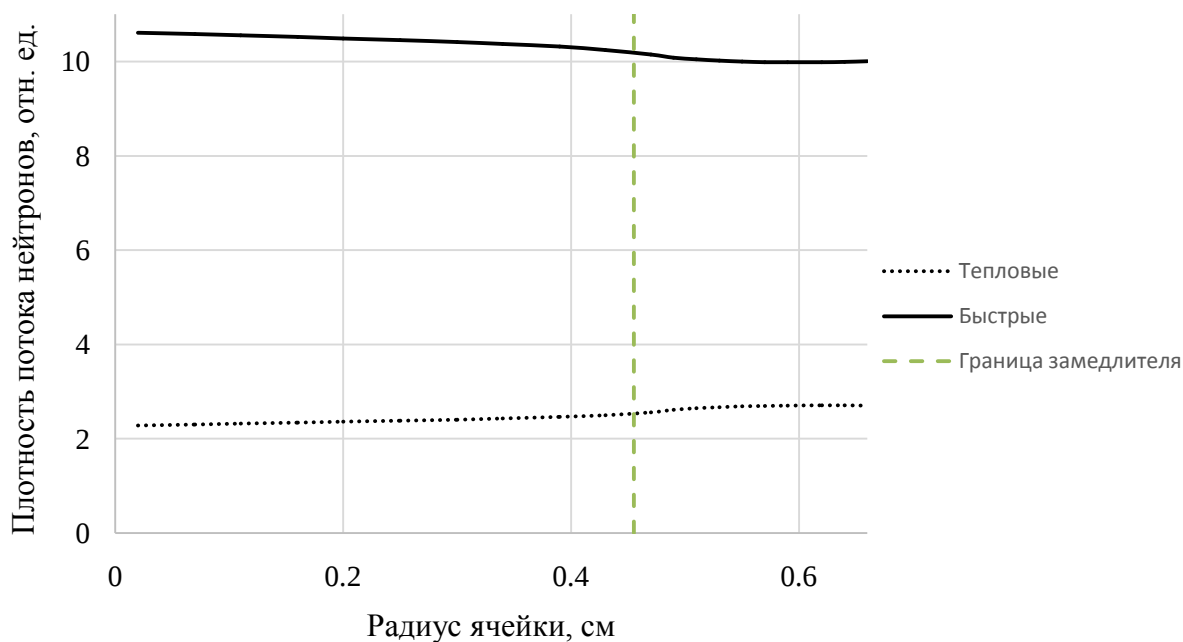


Рисунок 2.15 – Распределение быстрых и тепловых нейтронов по радиусу элементарной ячейки.

На графике видно, что при приближении к зоне замедлителя плотность потока быстрых нейтронов снижается, а тепловых, напротив, повышается. Это объясняется тем, что нейтроны, попадая в замедлитель, замедляются в нём и возвращаются обратно в фиктивный блок, т.к. сечение поглощения замедлителя мало. На рисунке 2.16 представлена зависимость энерговыделения от радиуса фиктивного блока.

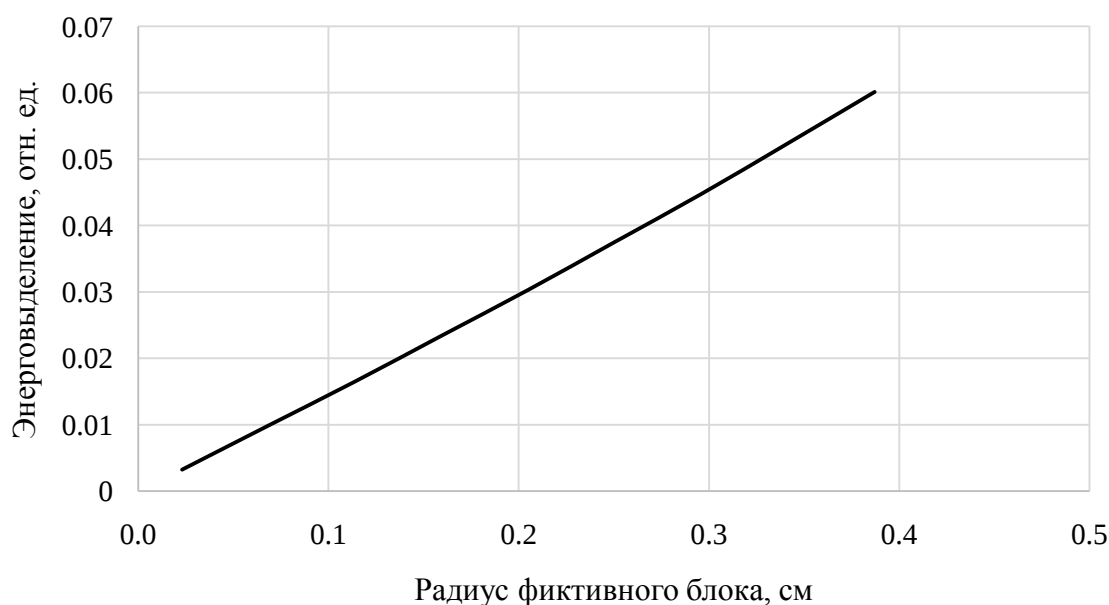


Рисунок 2.16 – Распределение энерговыделения по радиусу фиктивного блока

Анализируя график можно сделать вывод, что при приближении к границе раздела фиктивный блок – замедлитель энерговыделение значительно увеличивается. Это связано с тем, что горючее, применяемое в данной модели, делится преимущественно тепловыми нейтронами. Основываясь на график 2.16, мы знаем, что чем ближе к замедлителю, тем больше тепловых а нейтронов, а значит больше делений и энерговыделения.

2.8 Сравнение полученных данных

Чтобы проверить правильность расчетов, в таблице 2.6 приведена сравнительная таблица бесконечных коэффициентов размножения, рассчитанных разными методами.

Таблица 2.6 – Коэффициенты размножения в бесконечной среде, рассчитанные различными методами

Метод	«холодный»	«горячий»
однотуповой	1,3715	1,3563
WIMS	1,4332	1,3964
погрешность % (относительно WIMS)	4,1	2,87

На основе полученных данных можно сделать вывод, что реализованный вручную одnogрупповой расчет является менее точным по сравнению с многогрупповым.

3 Теплогидравлический расчет

3.1 Максимальные значения величин

Наибольшее значение энерговыделения находится в центре активной зоны, с координатами $z=0$ и $R=0$, то максимальное значение объемной плотности тепловыделения в топливе определяется соотношением:

$$q_v^{\max} = q_v(z=0, r=0) = \frac{N \cdot k_v}{n_{\text{кассет}} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \pi \cdot R_{\text{ТТ}}^2 \cdot H_{\text{а.з.}}}, \quad (3.1)$$

где z - осевая координата,

N - тепловая мощность реактора,

$n_{\text{кассет}}$ - количество топливных кассет,

$n_{\text{ТВЭЛ}}$ - количество тепловыделяющих элементов в кассете,

$R_{\text{ТТ}}$ - радиус топливной таблетки,

r - радиальная координаты

$H_{\text{а.з.}}$ - высота активной зоны,

k_v - коэффициент неравномерности энерговыделения по объему АЗ.

Для реакторов ВВЭР коэффициент k_v определяется следующим соотношением:

$$k_v = k_r k_E k_z k_{\text{ТВС}} k_{\text{мех}} k_{\text{мощ}} k_{\text{полг}}, \quad (3.2)$$

где k_r - коэффициент неравномерности по радиусу,

k_E - коэффициент неравномерности глубины выгорания,

k_z - коэффициент неравномерности по оси,

$k_{\text{ТВС}}$ - коэффициент неравномерности энерговыделения по ТВС,

$k_{\text{мех}}$ - коэффициент неравномерности, учитывающий технологические допуски,

$k_{\text{мощ}}$ - коэффициент неравномерности, учитывающий отклонения мощности,

$k_{\text{ногл}}$ - коэффициент неравномерности, учитывающий наличие компенсаторов реактивности в АЗ.

Для ВВЭР - 1000:

$$k_r, k_E = 1,35, k_z = 1,47, k_{TBC} = 1,16, k_{\text{мех}} = 1,15, k_{\text{моц}} = 1,08, k_{\text{ногл}} = 1,01$$

$$k_v = 1,35 \cdot 1,47 \cdot 1,16 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,01 = 2,88$$

Подставляя значение в формулу, найдем максимальное значение объемной плотности тепловыделения в топливе:

$$q_v^{\text{max}} = \frac{3000 \cdot 10^6 \cdot 2,88}{163 \cdot 312 \cdot 3,14 \cdot 0,3525^2 \cdot 435,86} = 1001,697 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}.$$

Найдем максимальное значение линейной плотности тепловыделения, а также значение поверхностного теплового потока:

$$q_l^{\text{max}} = q_v^{\text{max}} \cdot \pi \cdot R_{TT}^2 = 1001,697 \cdot 3,14 \cdot 0,3525^2 = 390,826 \frac{\text{Вт}}{\text{см}},$$

$$q_s^{\text{max}} = \frac{q_v^{\text{max}} \cdot R_{TT}^2}{2} = \frac{1001,697 \cdot 0,3525^2}{2} = 176,549 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

3.2 Расчет значений q_v , q_l и q_s по высоте наиболее энергонапряженной (центральной) кассеты

Для расчета кассету разобьем на 10 равных участков ($I = 10$). Теплоноситель в нашем случае подводится снизу, поэтому координаты, соответствующие середине участков, определяются соотношением:

$$z_i = -\frac{H_{\text{а.з.}}}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot i - 1}{I}\right), \quad (3.3)$$

где i - индекс, соответствующий участку.

Значения потоков q_v , q_l и q_s определим по формулам:

$$q_{v_i} = q_v^{\text{max}} \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{z_i}{H_{\text{а.з.}}}\right) \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}, \quad (3.4)$$

$$q_{l_i} = q_l^{\text{max}} \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{z_i}{H_{\text{а.з.}}}\right) \frac{\text{Вт}}{\text{см}}, \quad (3.5)$$

$$q_{s_i} = q_s^{\max} \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{z_i}{H_{a.3}}\right) \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}. \quad (3.6)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения объемной, поверхностной и линейной плотностей тепловыделения на всех участках

i	q_{vi} , МВт/м ³	q_{li} , кВт/м	q_{si} , МВт/м ²
1	157,409	6,142	0,277
2	455,258	17,763	0,802
3	708,588	27,647	1,249
4	892,627	34,827	1,573
5	989,377	38,602	1,744
6	989,377	38,602	1,744
7	892,627	34,827	1,573
8	708,588	27,647	1,249
9	455,258	17,763	0,802
10	157,409	6,142	0,277

Полученные данные в виде гистограмм представлены в приложении В.

3.3 Расчет температурного состояния и скорости по длине ТК, расход теплоносителя

Количество тепла, выделяемое на i – ом участке, определяется соотношением:

$$Q_i = q_{li} \cdot \Delta z \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} \quad (3.7)$$

где Δz - длина любого участка,

$$\Delta z = \Delta z_i = \text{const} = \frac{H_{a.3}}{I} = \frac{4,358}{10} = 0,4358 \text{ м.}$$

$$Q_1 = Q_{10} = 8,35 \cdot 10^5$$

$$Q_2 = Q_9 = 24,16 \cdot 10^5$$

$$Q_3 = Q_8 = 37,6 \cdot 10^5$$

$$Q_4 = Q_7 = 47,36 \cdot 10^5$$

$$Q_5 = Q_6 = 52,49 \cdot 10^5$$

Суммарное тепловыделение в центральной кассете в дискретном представлении:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^I Q_i = 33,99 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Суммарное тепловыделение в центральной кассете в интегральном представлении:

$$Q_{\Sigma}^* = \frac{2}{\pi} \cdot q_l^{\max} \cdot H_{\text{а.з.}} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{2}{3,14} \cdot 39082,659 \cdot 4,3586 \cdot 312 = 33,85 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Для определения погрешности проведенных ранее расчетов необходимо сравнить величину Q_{Σ} с Q_{Σ}^* . Погрешность:

$$\delta = \left| \frac{Q_{\Sigma} - Q_{\Sigma}^*}{Q_{\Sigma}^*} \right| \cdot 100 = \left| \frac{33,99 \cdot 10^6 - 33,85 \cdot 10^6}{33,85 \cdot 10^6} \right| \cdot 100 = 0,412 \%$$

Подогрев теплоносителя находится по формуле:

$$\Delta t = t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}} = \frac{Q_{\Sigma}}{G \cdot C_p}, \quad (3.8)$$

где $C_p = 4325 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ при $\bar{t} = 170 ^\circ\text{C}$

Подогрев теплоносителя в активной зоне:

$$\Delta t = t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}} = 208 - 131 = 77 ^\circ\text{C}.$$

Зная подогрев теплоносителя, расход определяется соотношением:

$$G = \frac{Q_{\Sigma}}{\Delta t \cdot C_p} = \frac{33,99 \cdot 10^6}{77 \cdot 4325} = 102,069 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Подогрев теплоносителя на каждом участке кассеты определяется по соотношению:

$$\Delta t_i = \frac{Q_i}{G \cdot C_{pi}}, \quad (3.9)$$

где C_{pi} — удельная теплоемкость теплоносителя при температуре на i -м участке.

Так как теплоемкость нам не известна, воспользуемся подбором.

Температура теплоносителя на i -м участке:

$$\bar{t}_i = t_{i-1} + \frac{Q_i}{G \cdot C_{pi}}, \quad (3.10)$$

где C_{pi} в первом приближении задается равной C_{pi-1} .

Затем значение C_{pi} уточняется по соотношениям:

$$C_{pi} = f(\bar{t}_i), \quad \bar{t}_i = \frac{(t_i + t_{i-1})}{2}, \quad (3.11)$$

где функция $C_p = f(t)$ табулирована.

После этого вычисление $\bar{t}_i$ повторяется и определяется значение t_i с использованием уточненного значения C_{pi} .

Гистограмма изменения температуры теплоносителя представлена в приложении В.

Изменение температурного состояния теплоносителя по длине кассеты приводит к изменению плотности и, следовательно, скорости движения теплоносителя:

$$v_i = \frac{G}{F_i \cdot \gamma_i}, \quad (3.12)$$

где F_i - площадь проходного сечения кассеты,

γ_i - плотность теплоносителя на i -м участке.

Функция $\gamma = f(t)$ табулирована, а температура теплоносителя на всех участках определена.

Площадь поперечного сечения прохода теплоносителя определяется:

$$F = S_{mk} - \pi \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot R_{\text{ТВЭЛ внеш}}^2 = 0,04742 - 3,14 \cdot 312 \cdot 0,00455^2 = 0,02714 \text{ м}^2$$

Результаты приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Изменения температуры, плотности и скорости движения теплоносителя по длине ТК.

i	t _i , C°	γ _i , кг/м ³	Скорость, м/с
1	131	941	3,997
2	139,55	933	4,031
3	148,1	926,2	4,061
4	156,65	918,4	4,095
5	165,2	910,2	4,132
6	173,75	901,8	4,171
7	182,3	893	4,212
8	190,85	883,9	4,255
9	199,4	874,5	4,301
10	208	864,6	4,350

Гистограмма изменения температуры и скорости теплоносителя по ТК представлена в приложении В.

3.4 Расчет коэффициентов теплоотдачи с поверхности ТВЭЛ

Для расчета локальных значений коэффициентов теплоотдачи используются следующие соотношения:

$$\alpha_i^0 = \frac{\lambda_i}{d_{\text{э}i}} \cdot Nu_i, \quad (3.13)$$

$$d_{\text{э}i} = \frac{4 \cdot F_i}{\Pi_i} \quad (3.14)$$

Где Nu_i - критерий Нуссельта

λ_i - коэффициент теплопроводности теплоносителя на i-м участке,

$d_{\text{э}i}$ — эквивалентный диаметр теплоносителя на i-м участке.

Π_i — периметр кассеты, омываемый на i-м участке теплоносителем.

$$\Pi = \Pi_{TK} + 2\pi \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot R_{\text{ТВЭЛ внеш}}^2 = 0,811 - 2 \cdot 3,14 \cdot 312 \cdot 0,00455 = 9,726 \text{ м.}$$

Эквивалентный диаметр равен:

$$d_9 = \frac{4 \cdot 0,02714}{9,726} = 0,0112 \text{ м}$$

Критерий Нуссельта определяется соотношением:

$$Nu_i = 0,073 \cdot (d_{9i})^{0,6} \cdot Re_i^{0,6} \cdot Pr_i^{0,3}, \quad (3.15)$$

где Re_i и Pr_i - критерии Рейнольдса и Прандтля соответственно.

Значения Re_i и Pr_i определяются соотношениями:

$$Re_i = \frac{\nu_i \cdot d_{9i} \cdot \gamma_i}{\mu_i} = \frac{\nu_i \cdot d_{9i}}{\nu_i}, \quad (3.16)$$

$$Pr_i = \frac{\nu_i}{a_i}, \quad (3.17)$$

где μ_i - динамическая вязкость,

ν_i - кинематическая вязкость,

a_i - коэффициент температуропроводности теплоносителя.

По определению $a_i = \frac{\lambda_i}{C_{pi} \cdot \gamma_i}$.

Коэффициент теплоотдачи на i -м участке определяется как произведение:

$$\alpha_i = \alpha_i^0 \cdot \varepsilon_{zi} \cdot \varepsilon_{qi}, \quad (3.18)$$

где ε_{zi} - коэффициент, учитывающий влияние гидравлической стабилизации:

$$\varepsilon_{zi} = \begin{cases} 1,57 & \text{при } \frac{z_c}{d_{9i}} \leq 0,05, \\ 0,86 + 0,54 \cdot \left(\frac{d_{9i}}{z_c} \right)^{0,4} & \text{при } 0,5 \leq \frac{z_c}{d_{9i}} \leq 30, \\ 1 & \text{при } \frac{z_c}{d_{9i}} > 30. \end{cases} \quad (3.19)$$

где $z_c = z_i' - z_{\text{м.с.}}$ - расстояние от данного участка до ближайшего местного сопротивления, расположенного выше по течению.

ε_{qi} - поправка на тепловую стабилизацию, которая вычисляется по соотношению:

$$\varepsilon_{qi} = \frac{q_{si}}{q_i}, \quad (3.20)$$

$$q_i = q_s^{\max} \cdot \frac{\cos\left(\pi \cdot \frac{z_i}{H_{a.3.}}\right)}{\left(\frac{3 \cdot d_{\vartheta}}{\Delta z^*} + 1\right)} \quad (3.21)$$

где Δz^* - расстояние от местного сопротивления до середины данного участка кассеты.

Результаты расчета представлены в таблицах 3.3 и 3.4 соответственно

Таблица 3.3 – Результаты расчета критерия Нуссельта

i	$\nu, 10^7 \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$	$a, 10^7 \text{ м}^2/\text{с}$	Re	Pr	Nu
1	2,312	0,685	1,726	192930,443	1,340	239,008
2	2,282	0,685	1,740	197126,126	1,312	240,579
3	2,200	0,685	1,750	206062,733	1,257	243,928
4	2,080	0,684	1,757	219751,891	1,184	249,024
5	1,946	0,682	1,757	236995,957	1,107	255,391
6	1,819	0,678	1,751	255924,886	1,039	262,378
7	1,714	0,673	1,738	274294,760	0,986	269,256
8	1,638	0,667	1,724	290028,991	0,950	275,340
9	1,589	0,661	1,712	302062,353	0,928	280,182
10	1,556	0,656	1,706	312038,482	0,912	284,215

Таблица 3.4 – Результаты расчета коэффициента теплоотдачи

i	$\alpha_0, \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	ε_{zi}	ε_{qi}	$\alpha, \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$
1	14673,635	1	1,0015	14695,051
2	14771,142	1	1,0016	14795,095
3	14974,883	1	1,0018	15002,202
4	15269,795	1	1,0021	15301,631
5	15610,855	1	1,0024	15648,827
6	15947,441	1	1,0029	15993,990
7	16236,664	1	1,0036	16295,905
8	16454,107	1	1,0049	16534,154
9	16602,390	1	1,0073	16723,542

10	16703,772	1	1,0146	16947,556
----	-----------	---	--------	-----------

3.5 Расчет температурного состояния на поверхности ТВЭЛа и ТТ

Температура поверхности ТВЭЛ на i -м участке определяется соотношением:

$$t_{\text{пов } i} = t_i + \frac{q_{si}}{\alpha_i}. \quad (3.22)$$

Температура на поверхности ТТ определяется соотношением:

$$t_{\text{ТТ } i} = t_{\text{пов } i} + \Delta t_i, \quad (3.23)$$

где Δt_i - перепад температуры на оболочке ТВЭЛ.

Для цилиндрического ТВЭЛ:

$$\Delta t_i = \frac{q_{si}}{\lambda_{\text{об}}(t_{\text{пов } i})} \cdot R_{\text{ТВЭЛ внеш}} \cdot \ln \frac{R_{\text{ТВЭЛ внеш}}}{R_{\text{ТВЭЛ внутр}}}, \quad (3.24)$$

где $R_{\text{ТВЭЛ внутр}}$ - внутренний радиус оболочки ТВЭЛ,

$\lambda_{\text{об}}(t_{\text{пов } i})$ - коэффициент теплопроводности материала оболочки при температуре $t_{\text{пов } i}$.

Таблица 3.5 – Распределение температуры поверхности ТВЭЛа и топливной таблетки по длине ТК

i	$t_{\text{пов } i}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_i, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ТТ } i}, ^\circ\text{C}$
1	149,879	9,599	159,478
2	187,172	27,865	215,038
3	221,784	43,894	265,678
4	250,036	55,907	305,943
5	269,531	62,383	331,914
6	279,095	62,558	341,652
7	278,472	56,431	334,902
8	268,061	44,658	312,719
9	248,845	28,501	277,346
10	224,370	9,761	234,131

3.6 Распределение температуры в топливной таблетке

Для цилиндрической топливной таблетки, расположенной в твэле на i -м участке, распределение температуры по радиусу описывается соотношением:

$$t_i(r) = t_{TTi} + \frac{q_{vi}}{4 \cdot \lambda_{\text{топ}}(t_{TTi})} \cdot (R_{TT}^2 - r^2), \quad (3.25)$$

где $\lambda_{\text{топ}}(t_{TTi})$ - коэффициент теплопроводности топлива при температуре t_{TTi} ,

r - текущее значение координаты $0 \leq r \leq R_{TT}$

Таблица 3.6 – Распределение температуры в топливной таблетке по радиусу и длине ТК

i	r, м			
	0,003525	0,00255	0,001575	0,0006
1	159,478	189,655	210,145	220,949
2	215,038	310,732	375,709	409,970
3	265,678	426,957	536,467	594,209
4	305,943	521,656	668,127	745,358
5	331,914	580,006	748,463	837,286
6	341,652	593,114	763,860	853,890
7	334,902	559,667	712,285	792,756
8	312,719	485,638	603,053	664,962
9	277,346	382,814	454,428	492,188
10	234,131	268,243	291,406	303,619

Температура в центре цилиндрической топливной таблетки:

$$t_{yi} = t_{TTi} + \frac{q_{vi}}{4 \cdot \lambda_{\text{топ}}(t_{TTi})} \cdot (R_{TT}^2 - 0,0006^2), \quad (3.26)$$

где $\lambda_{\text{топ}}(t_{TTi})$ - коэффициент теплопроводности топлива при температуре t_{TTi} ,

0,0006 - внутренний радиус таблетки

Распределение температуры в ТТ по радиусу, в наиболее энергонапряженном участке вычисляется по формуле:

$$t_{\text{ц}}^{\text{max}} = t_{\text{ТТ}}^{\text{max}} + \frac{q_v^{\text{max}}}{4 \cdot \lambda_{\text{топ}}(t_{\text{ТТ}}^{\text{max}})} \cdot (R_{\text{ТТ}}^2 - r^2). \quad (3.27)$$

Таблица 3.7 – Распределение температуры в центре ТВЭЛа по длине ТК и распределение температуры по радиусу в наиболее энергонапряженном участке

i	$t_{\text{ц}}, \text{C}$	r, м	$t_{\text{ц}}^{\text{max}}, \text{°C}$
1	220,949	0,003525	375,904
2	409,970	0,0032	474,258
3	594,209	0,002875	563,105
4	745,358	0,00255	642,446
5	837,286	0,002225	712,281
6	853,890	0,0019	772,609
7	792,756	0,001575	823,431
8	664,962	0,00125	864,747
9	492,188	0,000925	896,557
10	303,619	0,0006	918,860

Гистограмма распределения температуры на поверхности ТВЭЛа и ТТ по длине ТК, в центре ТТ по кассете, а также графическое представление изменения температуры в ТТ по радиусу на наиболее энергонапряженном участке приведены в приложении В.

3.7 Гидравлический расчет ТК

Для прокачки теплоносителя через кассету реактора с необходимой скоростью следует создать соответствующий перепад давления.

Для расчета гидравлического сопротивления кассеты воспользуемся формулой:

$$\Delta P_{\text{кассеты}} = \sum_i \Delta P_{Ti} + \sum_j \Delta P_{Mj}, \quad (3.28)$$

где ΔP_{Ti} - сопротивление трения на i-м участке кассеты,

ΔP_{Mj} - местное сопротивление (входные и выходные устройства, сужения, дистанцирующие решетки, изгибы и т. д.).

Сопротивление трения на i -м участке:

$$\Delta P_{Ti} = \frac{\xi_i \cdot \Delta z_i}{d_{\text{э}i}} \cdot \left(\frac{\gamma_i \cdot v_i^2}{2} \right), \quad (3.29)$$

где ξ_i - коэффициент трения на i -м участке,

Δz_i и $d_{\text{э}i}$ - длина и эквивалентный диаметр i -го участка кассеты,

γ_i и v_i - плотность и скорость теплоносителя на i -м участке.

Коэффициент трения в пучках ТВЭЛ (для треугольной решетки):

$$\xi_i = \xi_{\text{тр}} \cdot [0,57 + 0,18 \cdot (x - 1) + 0,53 \cdot (1 - \exp(-a))], \quad (3.30)$$

где $\xi_{\text{тр}}$ - коэффициент трения для круглой трубы:

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{1}{(1,82 \cdot \log(\text{Re}_i) - 1,64)^2}, \quad (3.31)$$

x - отношение расстояния между центрами соседних ТВЭЛ к диаметру

ТВЭЛ,

$$a = \begin{cases} 0,58 \cdot [1 - \exp(-70 \cdot (x - 1))] + 9,2 \cdot (x - 1) & \text{при } x < 1,02, \\ 0,58 + 9,2 \cdot (x - 1) & \text{при } x > 1,02. \end{cases} \quad (3.32)$$

где $x = \frac{1,275}{0,91} = 1,4,$

$$a = 0,58 + 9,2 \cdot (x - 1) = 4,27,$$

По пути теплоносителя отсутствуют местные сопротивления, соответственно суммарный перепад давления будет зависеть только от ΔP_{Ti} .

Таблица 3.8 – Расчет перепада давлений в каждой ячейке

i	ξ_i	$\Delta P_{тр}, \text{Па}$
1	0,0183	293515,513
2	0,0182	296032,259
3	0,0181	298205,676
4	0,0178	300738,346
5	0,0176	303447,701
6	0,0173	306274,226
7	0,0171	309292,382
8	0,0169	312476,635
9	0,0168	315835,446
10	0,0167	319451,882

Эпюра перепада давлений по кассете приведена в приложении В.

Подставляя в формулу сопротивления трения, а также местные сопротивления получим:

$$\Delta P_{\text{кассеты}} = \sum_i \Delta P_{Ti} = 30,553 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Мощность, необходимая для прокачки теплоносителя через АЗ реактора,

$$N_{\text{ТН}} = n_{\text{кассет}} \cdot \frac{G \cdot \Delta P_{\text{кассеты}}}{\eta \cdot \gamma} = 163 \cdot \frac{102,07 \cdot 30,553 \cdot 10^5}{0,95 \cdot 904,66} = 59,146 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Доля затрат энергии на прокачку теплоносителя через АЗ составляет

$$\frac{N_{\text{ТН}}}{N} \cdot 100 = \frac{59,146 \cdot 10^6}{3000 \cdot 10^6} \cdot 100 = 1,97 \% \quad \text{от} \quad \text{вырабатываемой} \quad \text{электрической}$$

мощности реактора.

3.8 Оценка критических тепловых потоков

В реакторах, охлаждаемых водой, с целью обеспечения безопасности производится расчет критических тепловых потоков $q_{si}^{\text{крит}}$. Если $q_{si}^{\text{крит}} > q_{si}$, то кризис теплоотдачи отсутствует.

Критический тепловой поток в водном теплоносителе, и цилиндрических ТВЭЛ, определяется по формуле:

$$q_s^{\text{крит}} = 41300 \cdot (\nu_i \cdot \gamma_i)^{0,5} \cdot \Delta t_h^{0,33} \cdot \left(\frac{V'}{V'' - V'} \right) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (3.33)$$

где t_s – температура кипящей воды при заданном давлении (15 Мпа),

$$V' = 0,00166 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \text{ и } V'' = 0,01035 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} - \text{удельные объемы пара и воды при}$$

$$t_s, \Delta t_h = t_s - t_{\text{вых}} = 208 - 131 = 72 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таблица 3.9 – Расчет критической тепловой нагрузки.

i	$q_{si}, \text{Вт/м}^2$	$q_s^{\text{крит}}, \text{Вт/м}^2$	$\Delta q_{si}, \text{Вт/м}^2$
1	277433,200	2436506,492	2159073,292
2	802392,575		1634113,917
3	1248887,136		1187619,356
4	1573254,822		863251,6698
5	1743776,185		692730,3075
6	1743776,185		692730,3075
7	1573254,822		863251,6698
8	1248887,136		1187619,356
9	802392,575		1634113,917
10	277433,200		2159073,292

Так как $\Delta q_{si} > 0$, то можно сделать вывод: кризиса теплоотдачи ни на одном участке не наблюдается.

3.9 Расчет термического напряжения в материалах ТВЭЛов и кассет

Для расчета величины термических напряжений в оболочке ТВЭЛ используется выражение:

$$\sigma_{\text{оби}} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t_i}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot \left(1 + \frac{m}{6 + 3 \cdot m} \right), \quad (3.34)$$

где α - коэффициент линейного теплового расширения ($12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$),

E - модуль Юнга (203 ГПа),

ν - коэффициент Пуассона (0.33),

Δt_i - перепад температуры на оболочке ТВЭЛ на i -м участке кассеты.

$$m = 1 - \frac{R_{\text{ТВЭЛ внутр}}}{R_{\text{ТВЭЛ внеш}}}.$$

Таблица 3.10 – Расчет термических напряжений в оболочке ТВЭЛ.

i	$\sigma_{\text{оби}}, \text{ МПа}$
1	8,020
2	23,281
3	36,673
4	46,709
5	52,121
6	52,266
7	47,147
8	37,311
9	23,812
10	8,155

Предельно допустимое напряжение циркониевого сплава составляет: $\sigma = 950 \text{ МПа}$. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что в рассматриваемом случае материал оболочки ТВЭЛ полностью соответствует режиму работы реактора.

Нормальные компоненты термомеханического напряжения определяются соотношениями:

$$\sigma_{rr}(r)_i = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_{vi}}{16 \cdot \lambda_{\text{топ}} \cdot (1 - \nu)} \cdot (r^2 - R_{\text{ТТ}}^2), \quad (3.35)$$

$$\sigma_{rr}(r)_i = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_{vi}}{16 \cdot \lambda_{\text{топ}} \cdot (1 - \nu)} \cdot (3 \cdot r^2 - R_{\text{ТТ}}^2), \quad (3.36)$$

$$\sigma_{rr}(r)_i = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_{vi}}{16 \cdot \lambda_{\text{топ}} \cdot (1 - \nu)} \cdot (4 \cdot r^2 - 2 \cdot R_{\text{ТТ}}^2), \quad (3.37)$$

где $\lambda_{\text{топ}}$ - коэффициент теплопроводности топлива, который берется для среднего (между центром и поверхностью ТТ) значения температуры (4,112 Вт/(м · К)),

α - коэффициент линейного теплового расширения ($10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$),

E - модуль Юнга (44 ГПа),

ν - коэффициент Пуассона (0,27).

Таблица 3.11 – Расчеты $\sigma_{rr}(r)_i$, $\sigma_{\theta\theta}(r)_i$, $\sigma_{zz}(r)_i$ на наиболее энергонапряженном участке кассеты.

r , м	σ_{rr} , МПа	$\sigma_{\theta\theta}$, МПа	σ_{zz} , МПа
0,003525	0	228,056	228,056
0,0032	-20,057	167,884	147,827
0,002875	-38,176	113,529	75,353
0,00255	-54,356	64,989	10,634
0,002225	-68,597	22,265	-46,332
0,0019	-80,900	-14,643	-95,542
0,001575	-91,264	-45,735	-136,999
0,00125	-99,689	-71,011	-170,701
0,000925	-106,176	-90,472	-196,648
0,0006	-110,724	-104,117	-214,841

Предельно допустимое напряжение ТТ составляет: $\sigma = (7,5-9,0)$ МПа

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что рассмотренные условия эксплуатации топлива приводят к разрушению топливной таблетки.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

4.1 Организация и планирование работ

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

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей не превышает двух, предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные вышеуказанные данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 30% И – 100%
Выбор исходных параметров	НР, И	НР – 100% И – 70%
Методика расчета	НР, И	НР – 100% И – 80%
Нейтронно-физический расчет ЯР	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

4.2 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ может осуществляться двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

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

- аналоговый;

– экспертный.

Аналоговый способ привлекает внешней простотой и околонулевыми затратами, но возможен только при наличии в поле зрения исполнителя ВКР не устаревшего аналога, т.е. проекта в целом или хотя бы его фрагмента, который по всем значимым параметрам идентичен выполняемой ВКР. В большинстве случаев он может применяться только локально – для отдельных элементов.

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

$$t_{ОЖ} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5} \quad (4.1)$$

$$t_{ОЖ} = \frac{t_{\min} + 4t_{\text{prob}} + t_{\max}}{6} \quad (4.2)$$

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

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

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

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

Для выполнения перечисленных в таблице 9.1 работ требуются специалисты:

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

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

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях:

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{ОЖ}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}} \quad (4.3)$$

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

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

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} \quad (4.4)$$

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

$T_{\text{ВД}}$ – выходные дни;

$T_{\text{ПД}}$ – праздничные дни.

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

В таблице 4.2 приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле 4.1, при использовании формулы 4.2 необходимо вставить в таблицу дополнительный столбец для $t_{\text{проб}}$. Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента $K_{\text{д}} = 1,2$.

Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{\text{ож}} \cdot K_{\text{д}}$. Столбцы 8 и 9 – трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на $T_{\text{к}}=1,212$. Итог по столбцу 5 дает общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоемкости для каждого из участников проекта. Величины трудоемкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9 кроме итогов, позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленного в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Трудозатраты на выполнение проекта

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

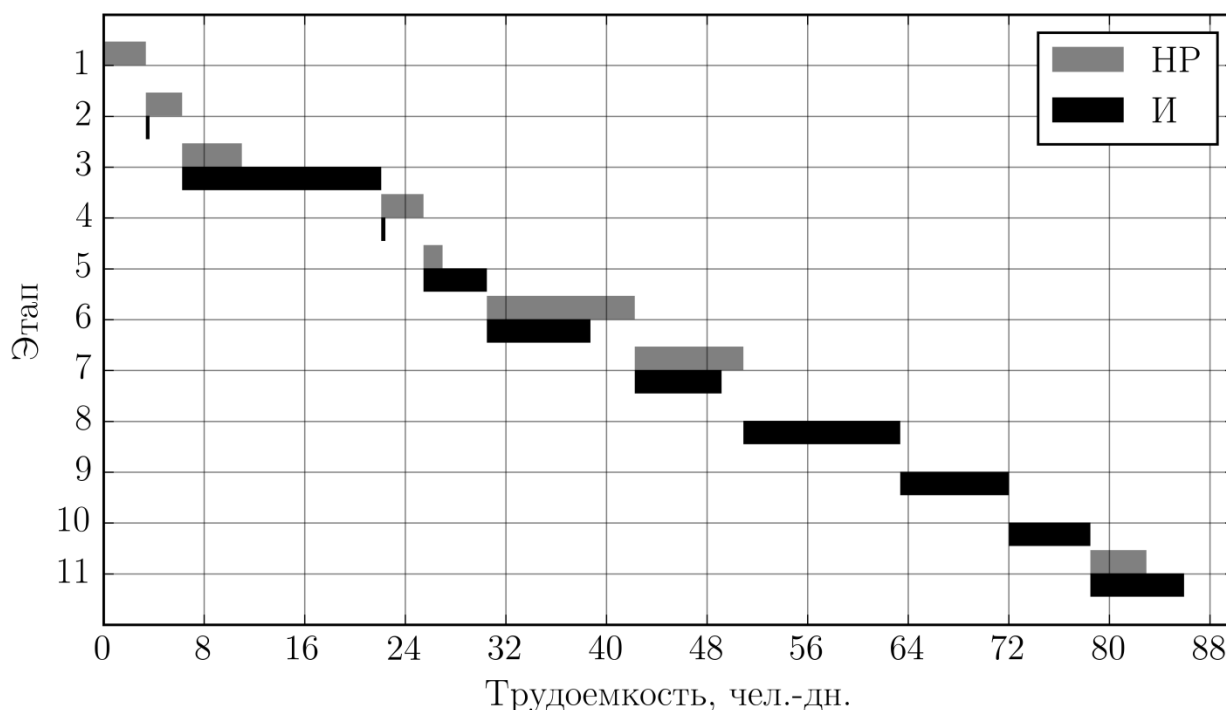


Рисунок 4.1 – Линейный график работ.

4.3 Расчет накопления готовности проекта

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

Введем обозначения:

- $TP_{\text{общ}}$ – общая трудоемкость проекта;
- TP_i (TP_k) – трудоемкость i -го (k -го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;
- TP_i^H – накопленная трудоемкость i -го этапа проекта по его завершении;
- TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоемкость работ, выполняемых j -м участником на i -м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, в нашем примере $m = 2$.

Степень готовности определяется формулой:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}} \quad (4.5)$$

Применительно к таблице 4.1 величины TP_{ij} (TP_{kj}) находятся в столбцах (6, $j = 1$) и (7, $j = 2$). $TP_{\text{общ.}}$ равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Пример расчета TP_i (%) и CG_i (%) на основе этих данных содержится в таблице 9.4.

Таблица 4.3 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

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

4.4 Расчет сметы на выполнение проекта

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

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);

- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

4.5 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в границах, представленных в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчет затрат на материалы

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

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

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

4.6 Расчет заработной платы

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

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083} \quad (4.6)$$

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

Пример расчета затрат на полную заработную плату приведены в таблице 9.6. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 4.1. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{ДОП.ЗП}} = 1,188$; $K_{\text{Р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{И}} = K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{ДОП.ЗП}} \cdot K_{\text{Р}}; \quad (4.7)$$

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

Таблица 4.5 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{\text{и}}$	Фон з/п, руб.
НР	33664	1342,10	41	1,699	93490,00
И	7864	313,52	63	1,620	31998,23
Итого:					125488,23

4.7 Расчет затрат на социальный налог

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

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3; \quad (4.8)$$

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

4.8 Расчет затрат на электроэнергию

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

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (4.9)$$

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

$C_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

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

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

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 9.1 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (4.10)$$

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

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

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном} \cdot K_c, \quad (4.11)$$

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

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

Для технологического оборудования малой мощности $K_c = 1$.

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $C_{эл.об}$, руб.
Персональный компьютер	224	0,3	386,3
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			387,42

4.9 Расчет амортизационных расходов

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

$$C_{ам} = \frac{H_A \cdot t_{об} \cdot C_{об} \cdot n}{F_d}, \quad (4.12)$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{об}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

F_d – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

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

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Например, для ПК в 2019 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне, F_d равен:

$$F_d = 298 \cdot 8 = 2384.$$

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

H_A определяется как величина обратная CA , в данном случае это:

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

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать:

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

4.10 Расчет прочих расходов

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

$$C_{ПРОЧ} = (C_{МАТ} + C_{ЗП} + C_{СОЦ} + C_{ЭЛ.ОБ} + C_{AM}) \cdot 0,1. \quad (4.13)$$

Прочие расходы в нашем случае:

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

4.11 Расчет общей себестоимости разработки

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

Таблица 4.7 – Смета затрат на разработку проекта

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

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

4.12 Расчет прибыли

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

$$G = C \cdot 0,2; \quad (4.14)$$

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

4.13 Расчет НДС

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

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2; \quad (4.15)$$

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

4.14 Цена разработки ВКР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{ВКР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (4.16)$$

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

4.15 Оценка экономической эффективности проекта

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

5 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 (Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.).

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, 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.

5.1 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 5.1.

Таблица 5.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.03.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ, Отделение ЯТЦ НИ ТПУ	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	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 организации работы»
	—	Пожарная безопасность	Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.1.004-91

На студента, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, электромагнитное поле низкой частоты, 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).

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

5.2.1 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.

5.2.2 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 5.1.

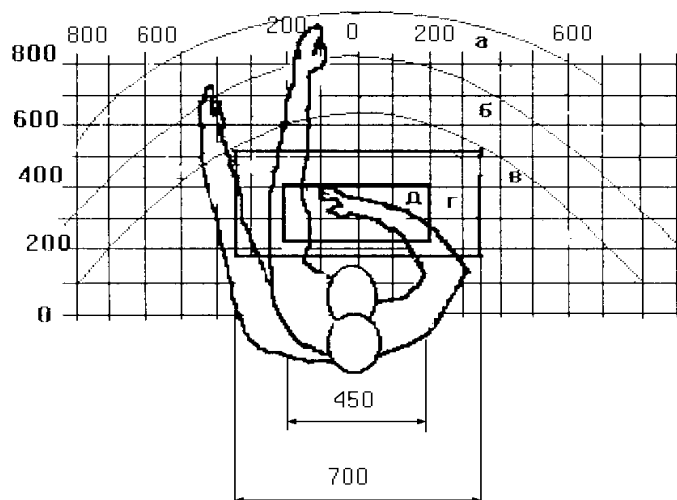


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- 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: в зоне в (слева), легкой досягаемости ладони находится 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 студента 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.

5.3 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 устанавливаются в соответствии СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. (Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»), приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – 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
Теплый	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 м^3 на человека – не менее 30 м^3 в час на человека; при объёме помещения более 40 м^3 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°C, зимой – 13-15 °C. 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.

При работе с компьютером использовался монитор, дисплей модуль которого изготовлен из жидкокристаллической матрицы, вследствие этого воздействие ионизирующего излучения сведено к минимуму.

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

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

Плотность магнитного потока должна быть не более:

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

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

5.4 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, токоведущих частей).

5.5 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [11] (ссылка на Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная 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;

- 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.

Заключение

В результате выполнения данной работы произведён предварительный расчёт «холодной» элементарной ячейки реактора и получены следующие значения для k_{∞} , $k_{\text{эф}}$ и скорости теплоносителя: 1,372; 1,361; 4,03 м/с, соответственно. Топливом являлся диоксид урана UO_2 с обогащением 3,3% по U^{235} .

Проведена оптимизация параметров ячейки k_{∞} . Путем изменения шага решетки и радиуса ТВЭЛа установлено наибольшее значение k_{∞} , которое составило 1,436 при скорости теплоносителя 3,2 м/с.

После расчёта «холодного» реактора произведён расчёт «горячего» реактора, для которого заданы рабочие температуры. Получены следующие результаты: бесконечный коэффициент размножения нейтронов 1,3563, эффективный коэффициент размножения нейтронов 1,3504, температурный эффект реактивности 0,59 %, температурный коэффициент реактивности - $3,953 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Также в ходе работы произведён многогрупповой расчёт элементарной ячейки реактора типа ВВЭР мощностью 3000 МВт в программе WIMS-D5B, в котором получены следующие результаты: бесконечный коэффициент размножения 1,433 для «холодного» состояния и 1,3972 для «горячего», для «горячего» гомогенного 1,2898, температурный эффект реактивности 1,8 %, температурный коэффициент реактивности – $(-12,0256 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1})$

Проведен теплогидравлический расчет, в результате которого получено распределения температурного поля в элементарной ячейке активной зоны реактора. Плотность теплового потока не превышает критических значений, соответственно, теплового кризиса не наблюдается. Температуры в ячейке не превышают допустимые нормы эксплуатации, расход и скорость теплоносителя также соответствуют норме. Однако расчет термических напряжений в ТТ

ТВЭЛа показал что таблетки могут разрушиться в процессе эксплуатации реактора от такого температурного режима.

Список использованных источников

1. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алтухов. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
2. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие. / Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н. – Томск: Томский государственный университет, 2002. – 192 с.
3. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1964. – 139 с.
4. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. Физические величины: Справочник // М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Головацкий А.В., Нестеров В.Н., Шаманин И.В. «Организация итерационного процесса при численном восстановлении спектра нейтронов в размножающей системе с графитовым замедлителем» // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53. № 11. – С. 10–14.
6. Пляскин В.И., Косилов Р.А., Мантуров Г.Н. Справочно-информационная интерактивная система ядерно-физических свойств нуклидов и радиоактивных цепочек распада [Электронный ресурс]. – 2000. – Режим доступа: <http://www.science-kaluga.ru/books/?content=file&id=841>. – Загл. с экрана.
7. Юркевич Г. П. Системы управления энергетическими установками / под ред. академика РАН Хлопкина Н. С. – М., Изд-во ЭЛЕКС-КМ, 2001. - 344 с.
8. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: Учеб. для неэнергетич. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1988. 479 с.
9. Теплопроводность двуокиси урана / В. И. Колядин, Э. П. Ильин, А. Г. Харламов и др. // Препринт ИАЭ – 2227. М., 1972.

10. Сборник нормативных материалов по безопасности АЭС. М.: Энергоатомиздат., 1985.
11. Characterization of Ignalina NPP RBMK Reactors Graphite. / Hacker, P. J.; Neighbour, G. B.; Levinskas, R.; Milcius, D. Materials Science, 2001, no. 1, p. 62–66.
12. Evaluation of the radiological consequences of ^{14}C due to contaminated Ignalina NPP graphite incineration. / Maceika, E., Remeikis, V., Ancius, D., Ridikas, D., 2005. Lith. J. Phys. 45, p. 383–391.
13. Анализ последовательностей отказов для оценки уязвимости АЭС с реактором РБМК при экстремальных воздействиях. Мишукова О.Н., Голубков А.В., Шиверский Е.А. В сборнике: Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2017 Москва, 2017. С. 246-249.
14. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных электростанций СП АЭС – 79. М.: Энергоиздат, 1981.
15. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 76). М.: Атомиздат, 1977.
16. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. – М.: Энергия, 1980. – 175 с.
17. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17.07.99 №181 – ФЗ. // Российская газ. – 1999. – 11.02. – С. 5
18. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. [Текст]. – Взамен ГОСТ 12.1.004. – 85. – Введ. 01.07.92. – Утв. Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 14.06.91 № 875.
19. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
20. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»

[Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с. 39.

21. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983- 01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с. 40.

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

23. Modelling of impurity activation in the RBMK reactor graphite using MCNPX. / Plukiene R., Plukis A., Puzas A., Remeikis V., Duskesas G., Germanas D., 2011. Progr. Nucl. Sci. Technol. 2, p. 421–426.

24. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя во входном участке ТВС. / Дмитриев С.М., Добров А.А., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2018. № 3. С. 168-175.

25. Virgilev Yu. S. Impurities in and Serviceability of Reactor Graphite. Atomic Energy, 1998, vol. 84, no. 1, p. 6–13.

26. Управление запроектной аварией с полным обесточиванием энергоблока АЭС с РБМК-1000 и образованием свищей в трубах топливных каналов. Жуков И.В., Сафонов В.К., Чулкова Е.В. В сборнике: Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2017 Москва, 2017. С. 238-239.

27. Экспериментальное исследование прочности графитовых блоков РБМК-1000. / Алишин М.И., Рахманов А.П., Решетин В.Л., Слободчиков А.В. В сборнике: Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2017 Москва, 2017. С. 196-198.

28. Almenas, K.; Kaliatka, A.; Uspuras, E. Ignalina RBMK-1500: A source book. 2nd ed. Kaunas: Lithuanian Energy Institute, 1998. 196 p.

29. Упрощенная математическая модель и реализация остаточного ресурса ядерного топлива при выводе из эксплуатации реактора типа РБМК. Загребаев А.М., Залужная Г.А., Наумов В.И. Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 5. С. 255-258.

30. Structural investigation of RBMK nuclear graphite modified by $^{12}\text{C}^+$ ion implantation and thermal treatment. / Elena Lagzdina, Danielius Lingis, Artūras Plukisa, Rita Plukiene. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. Volume 444, 1 April 2019, Pages 23-32.

31. Modelling of the spatial distribution of the induced activities in the RBMK-1500 reactor graphite blocks and rings/sleeves. / Ernestas Narkunas, Arturas Smaizys, Povilas Poskas, Gytis Bartkus. Progress in Nuclear Energy. Volume 91, August 2016, Pages 265-276.

32. Evaluation of dose rate variation during very long term storage of RBMK-1500 reactor used fuel. / A.Šmaižys, P.Poškas, E.Narkūnas. Annals of Nuclear Energy. Volume 109, November 2017, Pages 192-198.

33. 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

(обязательное)

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

Материал	Величина												
	σ_a	σ_f	σ_s	σ_c	μ_s	σ_{tr}	Σ_a	Σ_f	Σ_s	Σ_c	Σ_{tr}	ξ	$\xi\Sigma_s$
U ⁸	1,98	0	9	2,71	0	10,98	0,0448	0	0,204	0,061	0,249	$8,38 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$
U ⁵	498	424,3	15	101	0	513	0,385	0,328	0,012	0,078	0,397	$8,49 \cdot 10^{-3}$	$9,84 \cdot 10^{-5}$
O _{топ}	0	0	3,75	0	0,04	3,60	0	0	0,176	0	0,169	$1,199 \cdot 10^{-1}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$
H ₂ O	-	-	-	-	-	-	0,019	0	2,3	0,019	1,998	$5,06 \cdot 10^{-1}$	1,168
Zr	0,13653	0	6,2	0,185	0,01	6,27	0,0058	0	0,267	0,008	0,27	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$5,82 \cdot 10^{-3}$
Nb	0,88	0	6,5	1,16	0,01	7,31	0,00037	0	0,0028	0,00049	0,003	$2,14 \cdot 10^{-2}$	$5,91 \cdot 10^{-5}$

Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б.1 – Макроскопические сечения после гомогенизации первого и второго вида

Материал	Величина									
	1-ая гомогенизация					2-ая гомогенизация				
	Σ_a	Σ_f	Σ_s	Σ_c	Σ_{tr}	Σ_a	Σ_f	Σ_s	Σ_c	Σ_{tr}
U ⁸	0,012	0	0,055	0,017	0,067	0,03	0	0,137	0,041	0,167
U ⁵	0,104	0,088	0,003	0,021	0,107	0,259	0,221	0,008	0,052	0,267
O _{топ}	0	0	0,047	0	0,045	0	0	0,118	0	0,113
H ₂ O	0,01029	0	1,243	0,01029	1,076	0,019	0	2,3	0,019	1,998
Zr	0,00077	0	0,035	0,001	0,035	0,0019	0	0,0875	0,0026	0,0885
Nb	0,00005	0	0,0004	0,00006	0,00041	0,00012	0	0,0009	0,00016	0,001

Приложение В

(обязательное)

Рисунок В.1 – Распределение объемной плотности тепловыделения по длине ТК.

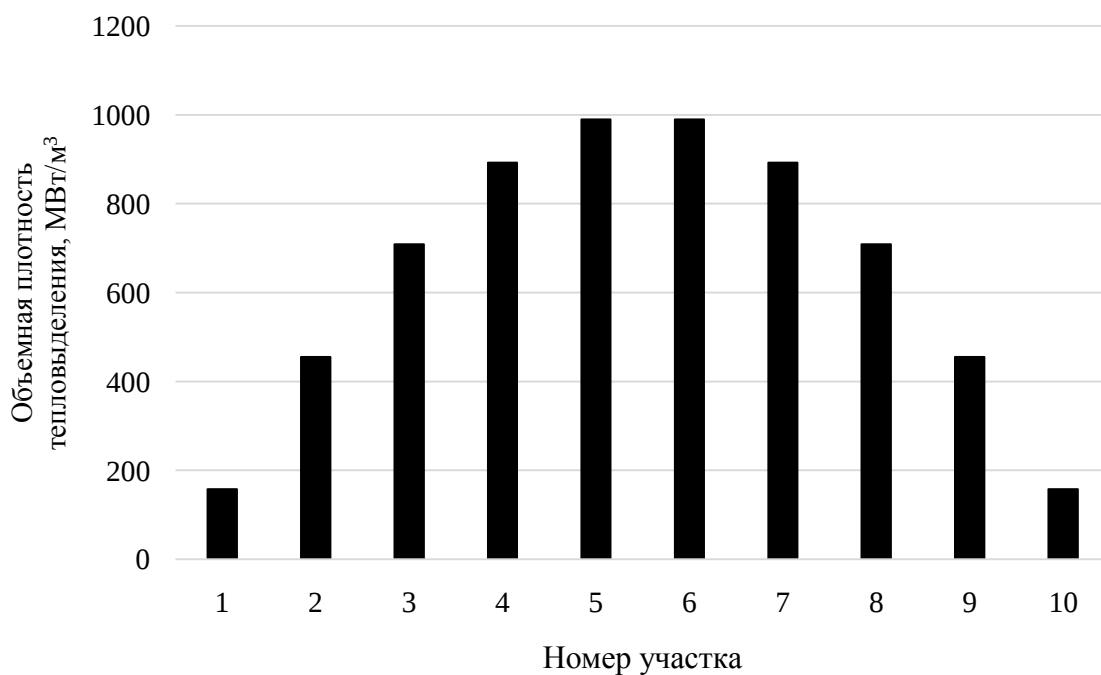


Рисунок В.2 – Распределение поверхностной плотности тепловыделения по длине ТК.

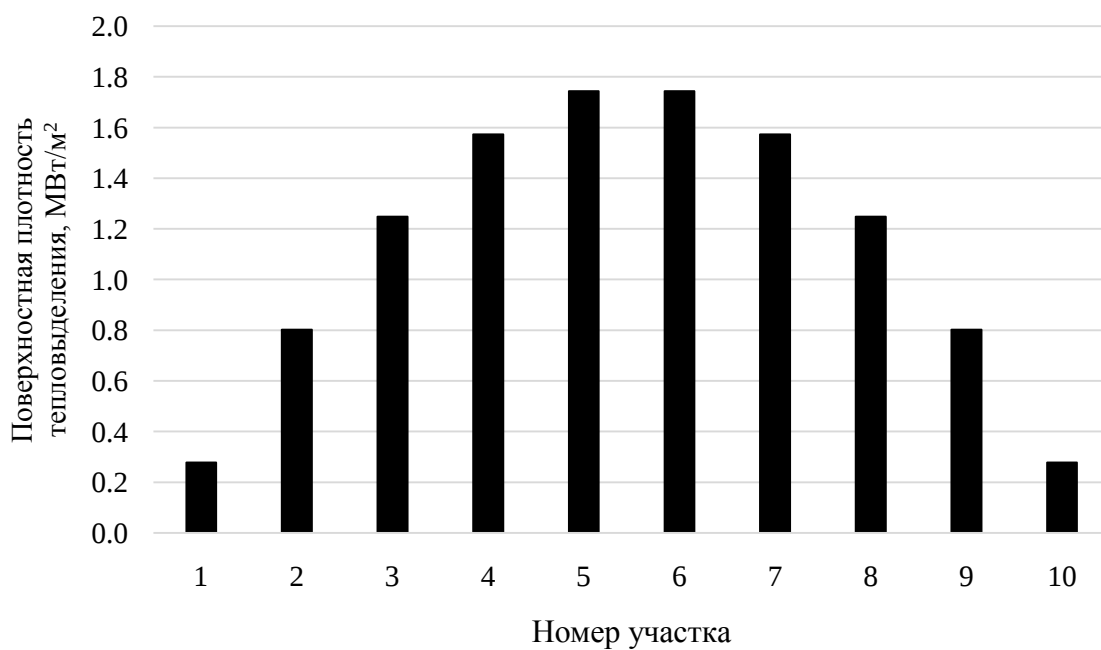


Рисунок В.3 – Распределение линейной плотности тепловыделения по длине ТК.

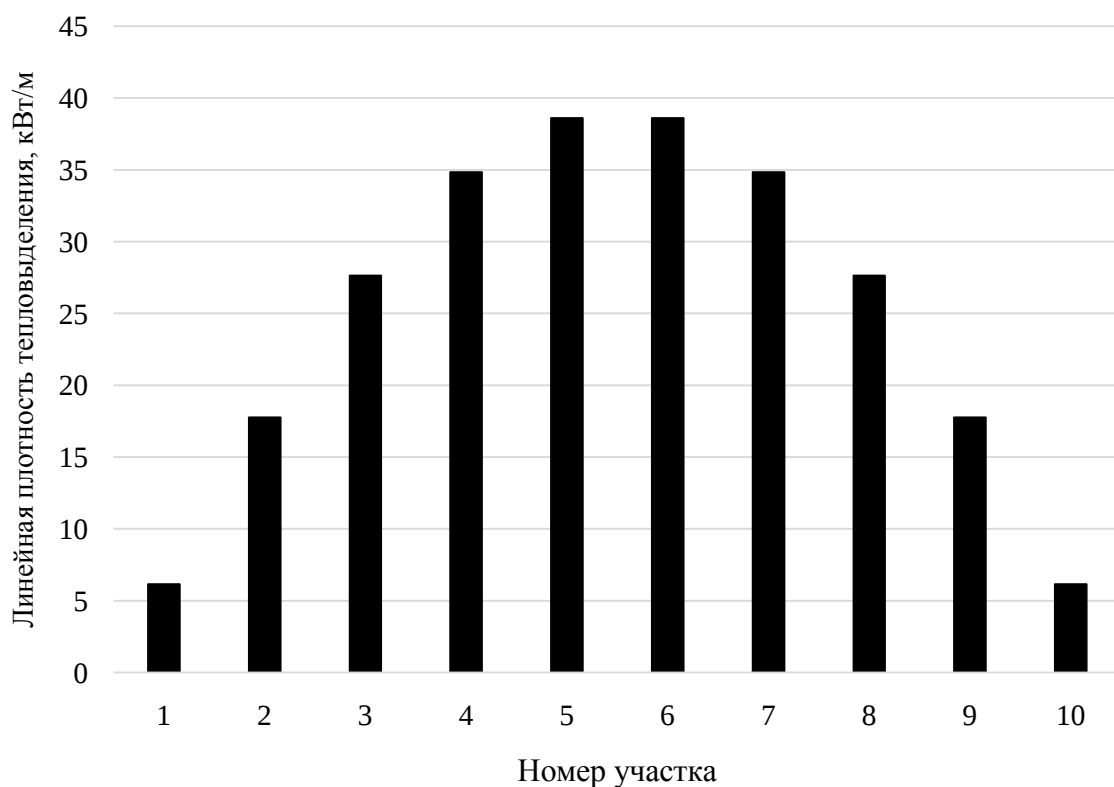


Рисунок В.4 – Распределение температуры теплоносителя по длине ТК

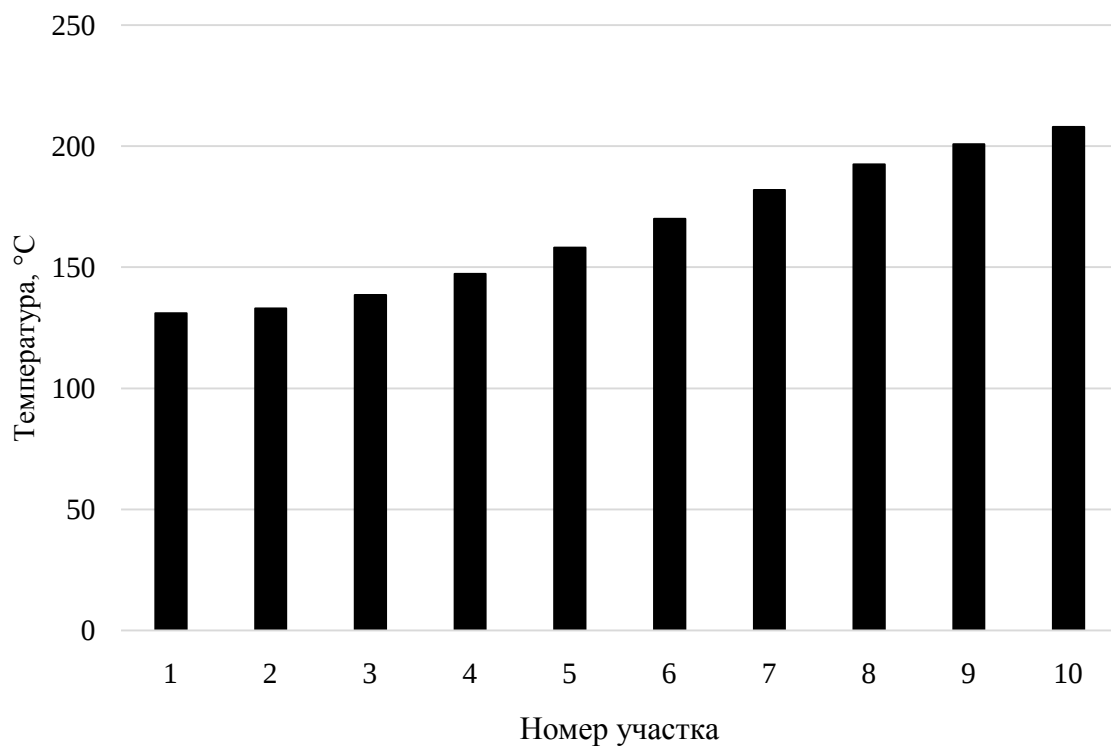


Рисунок В.5 – Распределение скорости теплоносителя по длине ТК

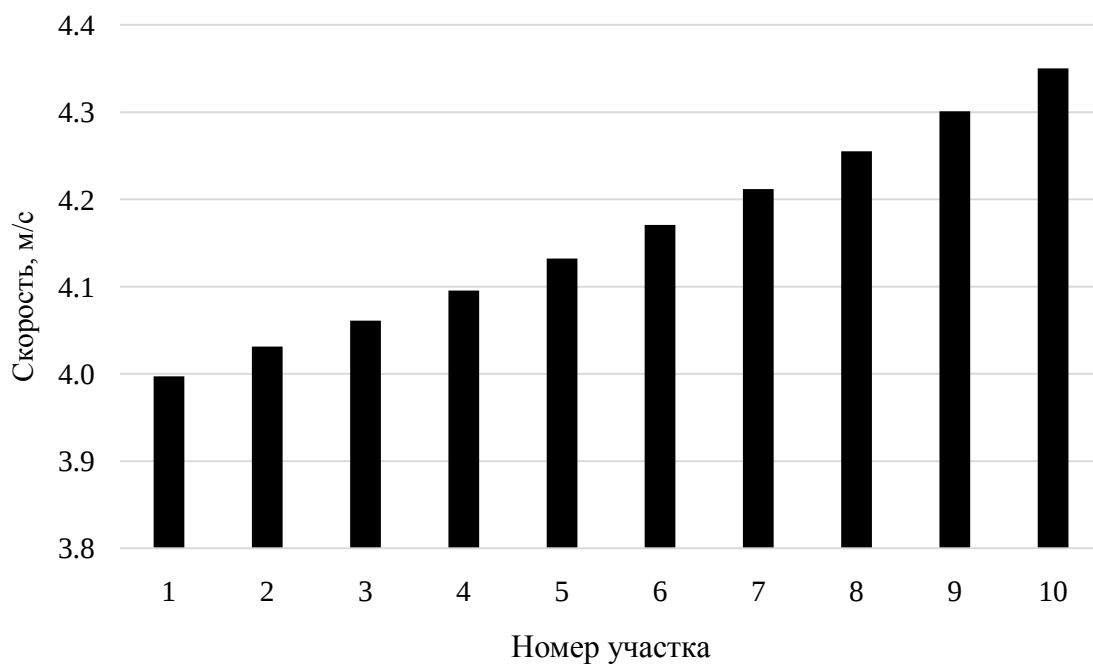


Рисунок В.6 – Распределение температуры на поверхностях ТВЭЛа, топливной таблетки, в центре топливной таблетки.

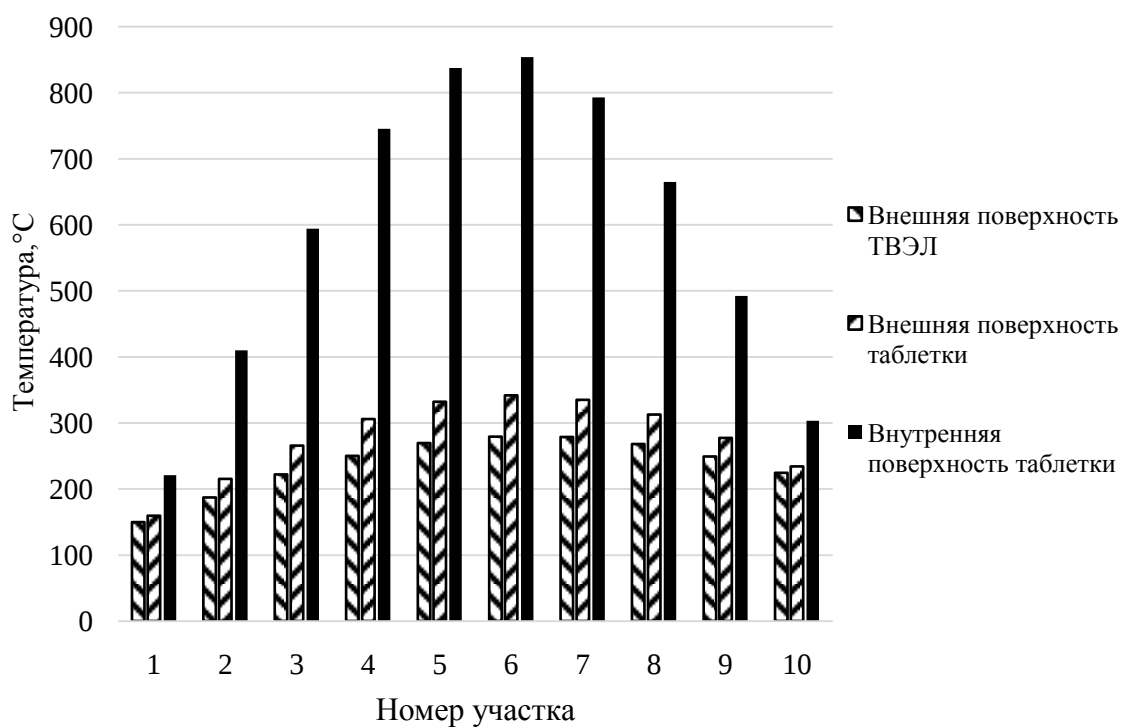


Рисунок В.7 – Распределение температуры в топливной таблетке по радиусу в наиболее энергонапряженном участке

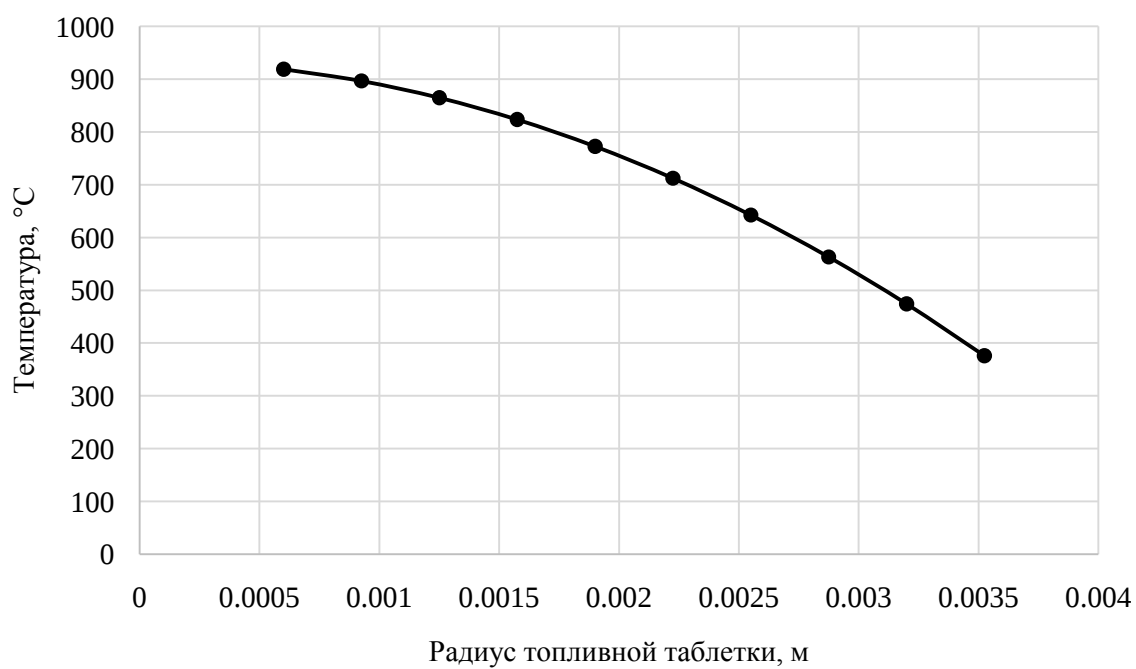


Рисунок В.8 – Эпюра перепада давлений по кассете

