

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

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

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа УГР мощностью 900 МВт

УДК 621.039.536

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Зубанов Павел Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Данейкин Ю.В.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечина А.А.	к.х.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2016 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

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

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

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

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой ФЭУ
 _____ 16.05.2016 О.Ю. Долматов
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A2B	Зубанову Павлу Александровичу

Тема работы:

Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа УГР мощностью 900 МВт	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	16.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).	- Тепловая мощность 900 [МВт] - Ядерное горючее UN - Обогащение урана 2 % - Температура на входе 300 [°C] - Температура на выходе 480 [°C] - Материалы оболочек ТВЭЛов и кассет сталь 1X18H9T
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	- Нейтронно-физический расчет «холодного» реактора - Нейтронно-физический расчет «горячего» реактора - Многогрупповой расчет - Расчёт нуклидного состава ядерного топлива
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	- Презентация - Чертеж ячейки

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Нейтронно-физический расчет реактора	Данейкин Юрий Викторович
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Сечина Ася Александровна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Нет	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	16.05.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ	Данейкин Ю.В.	к.ф.-м.н.		16.05.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Зубанов Павел Александрович		16.05.2016

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A2B	Зубанову Павлу Александровичу

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

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

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

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечина А.А.	к.х.н.		16.05.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Зубанов Павел Александрович		16.05.2016

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0A2B	Зубанов Павел Александрович

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

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

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 (с ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		16.05.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Зубанов Павел Александрович		16.05.2016

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

Институт Физико-технический

Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Уровень образования высшее

Кафедра Физико-энергетические установки

Период выполнения (весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	16.06.2015
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
16.05.2016	Выдача задания	
19.05.2016	Выбор конструктивной схемы	
26.05.2016	Расчет критических параметров проектируемого реактора	
02.06.2016	Расчет характеристик «горячего реактора», многогрупповой нейтронно-физический расчет	
09.06.2016	Расчет эффектов реактивности	
16.06.2016	Сдача работы	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ	Данейкин Ю.В.	к.ф.-м.н.		16.05.2016

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О.Ю.	к.ф.-м.н., доцент		16.05.2016

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 100 страниц, 17 рисунков, 21 таблицу, 10 источников, 9 приложений, 2 чертежа.

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

Объектом исследования является ядерный реактор мощностью 900 МВт с топливом UN и обогащением 2 % и с жидкометаллическим теплоносителем.

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

В результате исследования произведён нейтронно-физический расчет данного реактора, в частности оценены размеры активной зоны, рассчитаны коэффициенты размножения «холодного» и «горячего» реактора. Произведён многогрупповой расчёт, а также расчёт отравления и шлакования по разработанному программному продукту.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: реактор типа УГР, тепловая мощность 900 МВт, ядерное горючее UN, обогащение 2 %, теплоноситель – свинец, материал оболочек ТВЭЛов и кассет – сталь 1X18H9T.

Область применения: ядерная энергетика.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

Определения и сокращения

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

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

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

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

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

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

БН – быстрые нейтроны;

ВВЭР – водо–водяной энергетический реактор;

МэВ – мегаэлектронВольт;

РБМК – реактор большой мощности канальный;

ТКР – температурный коэффициент реактивности;

ТЭР – температурный эффект реактивности;

УГР – уран-графитовый реактор;

ЖМТ – жидкометаллический теплоноситель;

КВ – коэффициент воспроизводства.

Содержание

Введение	15
1 Обзор литературы	16
1.1 Уран-графитовые реакторы.....	16
1.2 Тепловыделяющие элементы реакторов.....	16
1.3 Ядерно-топливные материалы	17
2 Нейтронно-физический расчёт реактора	19
2.1 Предварительный расчет	19
2.2 Расчет концентраций	23
2.2.1 Расчет концентрации топлива.....	23
2.2.2 Расчет концентрации теплоносителя	24
2.2.3 Расчет концентрации оболочки	24
2.2.4 Доли материалов в ячейке	24
2.3 Расчет микросечений и макросечений для «холодного» реактора	25
2.3.1 Микросечения и макросечения для U^{235}	26
2.3.2 Микросечения и макросечения для U^{238}	27
2.3.3 Микросечения и макросечения для азота	28
2.3.4 Макросечения для нитрида урана	29
2.3.5 Расчет микросечения и макросечения для хрома	29
2.3.6 Расчет микросечения и макросечения для марганца.....	30
2.3.7 Расчет микросечения и макросечения для титана	30
2.3.8 Расчет микросечения и макросечения для никеля.....	31
2.3.9 Расчет микросечения и макросечения для железа.....	32
2.3.10 Расчет макросечения для стали	32
2.4 Оптимизация параметров ячейки и расчет эффективного коэффициента размножения	34
2.4.1 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды.....	34
2.4.2 Расчет эффективного коэффициента размножения.....	38
2.4.3 Оптимизация параметров ячейки	39

2.5 Температурные эффекты реактивности.....	41
2.5.1 Зависимость поперечных сечений от температуры.....	42
2.5.2 Коэффициент размножения «горячего» реактора	45
2.6 Многогрупповой расчет, спектр и ценности нейтронов в активной зоне.	47
2.6.1 Пересчет концентраций	48
2.6.2 Многогрупповой расчет	49
2.6.3 Определение параметров двухгруппового расчета	54
2.7 Расчет нуклидного состава ядерного топлива реактора	55
2.7.1 Цепочки ядерных превращений в облученном ядерном топливе.....	56
2.7.2 Построение цепочек ядерных превращений	56
2.7.3 Подготовка ядерно-физических данных.....	58
2.7.4 Модель накопления изотопов в облученном ядерном топливе	59
2.8 Расчет отравления реактора	63
2.8.1 Расчет отравления реактора с помощью разработанного программного продукта	63
2.8.2 Расчет отравления реактора по известным соотношениям	65
2.8.3 Сравнение полученных результатов	72
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	73
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования	73
3.2 Анализ конкурентных технических решений	74
3.3 SWOT-анализ.....	76
3.4 Планирование научно-исследовательских работ.....	79
3.4.1 Структура работ в рамках научного исследования	79
3.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ	81
3.4.3 Разработка графика проведения научного исследования	82
3.4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	83
3.4.5 Расчет материальных затрат НТИ	83
3.4.6 Основная заработная плата исполнителей темы	85
3.4.7 Формирование бюджета затрат НИП.....	88

3.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	89
4 Социальная ответственность.....	92
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	92
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	94
4.2.1 Организационные мероприятия.....	94
4.2.2 Технические мероприятия.....	94
4.2.3 Условия безопасной работы.....	97
4.3 Электробезопасность	99
4.4 Пожарная и взрывная безопасность	100
Заключение	103
Список публикаций.....	104
Список используемых источников.....	105
Приложение А	107
Приложение Б	108
Приложения В.....	109
Приложение Г	110
Приложение Д.....	111
Приложение Е.....	112
Приложение Ж ФЮРА.562527.009 СБ	116
Приложение З ФЮРА.562527.009.....	117
Приложение И ФЮРА.562527.009 СП	118

Введение

Основная задача нейтронно-физического расчета реактора состоит в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров реактора, удовлетворяющего поставленным требованиям. Выбрав и обосновав конструктивную схему реактора, необходимо далее провести оценочный тепловой расчет, в результате которого определяются размеры активной зоны.

После определения параметров нейтронно-физического расчета, производится расчет спектров нейтронов и их ценностей в активной зоне в 26-групповом диффузионном приближении. Физический расчет заканчивается расчетом изотопного состава топлива, а также расчетом отравления и шлакования с помощью разработанного программного продукта.

Наряду с изменением изотопного состава реактора изменяется его температура. Изменения температуры происходят при переходе реактора из холодного состояния в рабочее состояние, а также при переходе с одного уровня мощности на другой уровень.

Результаты работы могут найти применение в научно-исследовательских институтах атомной энергетики.

1 Обзор литературы

1.1 Уран-графитовые реакторы

Графит имеет очень низкое сечение поглощения нейтронов, химически довольно инертен, термостоек, обладает высокой теплопроводностью. Особенности, возникающие вследствие проектирования и эксплуатации реакторов с графитовым замедлителем:

- возможность использования в сочетании с графитом различных теплоносителей, в том числе высокотемпературных;
- более высокие коэффициенты воспроизводства, чем в ВВЭР;
- функционирование системы с перегрузкой работающего реактора;
- минимальное количество конструкционных материалов в активной зоне при использовании природного урана в сочетании с газовым теплоносителем;

С другой стороны, реакторы с графитовым замедлителем обладают определенными недостатками:

- относительно малая замедляющая способность и большая длина замедления приводит к большим размерам и, соответственно, низкой плотности теплосъема активной зоны;
- длительные радиационные воздействия приводят не только к изменению физико-механических свойств и размеров графита, но и сопровождаются значительным накоплением внутренней энергии.

Свинцовый теплоносителей ранее использовался в качестве теплоносителя небольшой серии реакторов атомных подводных лодок.

Сейчас разрабатываются проекты быстрых реакторов со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем.

1.2 Тепловыделяющие элементы реакторов

ТВЭЛы и ТВС – наиболее ответственные элементы энергетического реактора.

Конструкция и материалы твэлов и ТВС должны обеспечивать их надежную работу при высоких плотностях энерговыделения и при больших глубинах выгорания твэлы также выполняют функции барьеров безопасности, они предотвращают выход высокоактивных продуктов деления в теплоноситель.

Существует достаточно большое количество конструктивных форм твэлов. В зависимости от геометрической формы различают блочковые, стержневые, кольцевые, трубчатые, пластинчатые, ленточные, шаровые, призматические твэлы. Чаще всего применяются твэлы стержневой и трубчатой формы (реже пластинчатые) в оболочках из сплавов на основе алюминия, железа, циркония, а высокотемпературные твэлы – в керамической оболочке.

В курсовой работе используются стержневые твэлы с наружным охлаждением.

Обычно твэл состоит из топливного сердечника, оболочки, отделяющей сердечник от теплоносителя и замедлителя, и концевых деталей, герметизирующих полость сердечника. Внутри оболочки предусматривают свободные объемы для компенсации разности термических расширений сердечника и оболочки и для сбора газообразных продуктов деления. Обычно зазор не превышает $0,05 \pm 0,2$ мм. Кроме радиального зазора, необходимо предусмотреть газовые полости, в которых накапливаются газообразные продукты деления (в основном, атомы ксенона и криптона). Эти полости могут быть выполнены в виде осевого зазора, расположенного на конце твэла (за пределами активной зоны), или в виде отверстия по центру сердечника, распределенного по длине, либо в форме углублений на стыках таблеток, из которых состоит сердечник.

1.3 Ядерно-топливные материалы

Соединение UN является наиболее стабильным. Мононитрид урана имеет гранецентрированную кубическую кристаллическую структуру, а его теоретическая плотность составляет $14,32 \text{ г/см}^3$. Из сравнений температурных

зависимостей теплопроводности UO_2 , UC, UN следует, то теплопроводность UO_2 и UC уменьшается с ростом температуры, а теплопроводность UN увеличивается. UN имеет высокую теплопроводность.

Недостатком монокридного топлива, содержащего естественный азот, является образование C^{14} и трития при облучении. Однако вклад их активностей в общую величину невелик и лишь требует отделения и удержания C^{14} в процессе регенерации. Доля образующегося на азоте трития не превышает 10 % от его выхода в монокриде, обусловленного в основном тройным делением урана и плутония. Нарботку C^{14} можно снизить, обогащая азот изотопом N^{15} .

2 Нейтронно-физический расчёт реактора

2.1 Предварительный расчет

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

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

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

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

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

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

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

m – отношение высоты к диаметру;

N – заданная мощность реактора;

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

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

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

где K_V – объемный коэффициент неравномерности тепловыделения.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

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

где Π_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛА;

n – число ТВЭЛОВ в кассете;

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

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

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

где v – скорость теплоносителя на входе;

K_z – осевой коэффициент неравномерности;

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

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

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

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

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

В противном случае величину теплосодержания как функцию параметров теплоносителя следует определять по специальным таблицам или графикам.

Для проведения расчета были приняты следующие величины:

Тепловая мощность	$N = 900 \text{ МВт}$
Средняя удельная объемная нагрузка	$\bar{N}_0 = 9 \text{ кВт/л}$
Коэффициент увеличения объёма реактора за счёт СУЗ	$\eta = 1,2$
Отношение высоты к диаметру	$m = 0,95$
Объемный коэффициент неравномерности	$K_V = 2,5$
Осевой коэффициент неравномерности	$K_z = 1,35$
Размер ячейки под ключ	34 см
Число твэлов в кассете	19
Диаметр топливной таблетки	1,45 см
Внешний диаметр твэла	1,5 см
Внутренний диаметр твэла	1,45 см
Внутренний радиус трубы технологического канала	$R_{т.к.} = 10 \text{ см}$
Толщина стенки технологического канала	$\Delta_{т.к.} = 0,02 \text{ см}$

Объем активной зоны:

$$V_{a.з.} = \frac{N}{\bar{N}_0} \cdot \eta = \frac{900 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{9 \cdot 10^{-3}} = 1,2 \cdot 10^8 \text{ см}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{a.з.} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{a.з.}}{\pi \cdot m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,2 \cdot 10^8}{3,14 \cdot 0,95}} = 543,8 \text{ см}.$$

Высота активной зоны:

$$H_{a.з.} = m \cdot D_{a.з.} = 0,95 \cdot 543,8 = 516,6 \text{ см}.$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\max}} = \bar{N}_0 \cdot K_V = 9 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 = 23 \cdot 10^{-3} \text{ кВт/см}^3.$$

Площадь сечения ячейки:

$$S_{яч.} = a_{яч.}^2 = 34^2 = 1156 \text{ см}^2,$$

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

Периметр тепловыделяющей поверхности твэла:

$$Π_0 = π · d_{\text{твэл}_{\text{внеш.}}} = 3,14 · 1,5 = 4,712 \text{ см.}$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\text{max}} = \frac{N_{0\text{max}} \cdot S_{\text{яч.}}}{0,116 \cdot Π_0 \cdot n} = \frac{23 \cdot 10^{-3} \cdot 1156}{0,116 \cdot 4,712 \cdot 19} = 2,56 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Площадь сечения твэлов в кассете:

$$S_{\text{твэл}} = π \cdot \frac{d_{\text{твэл}_{\text{внеш.}}}^2 \cdot n}{4} = 3,14 \cdot \frac{1,5^2 \cdot 19}{4} = 33,56 \text{ см}^2.$$

Необходимая скорость прокачки теплоносителя при, $\rho = 11,35 \text{ г/см}^3$ и $C_p = 0,039 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$:

$$\Delta i = C_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 0,039 \cdot (480 - 300) = 7,02 \text{ ккал/кг.}$$

Площадь технологического канала:

$$S_{\text{т.к.}} = π \cdot R_{\text{т.к.}}^2 = 3,14 \cdot 10^2 = 314 \text{ см}^2.$$

Площадь замедлителя:

$$S_{\text{зам.}} = S_{\text{яч.}} - S_{\phi} = S_{\text{яч.}} - π \cdot (R_{\text{т.к.}} + \Delta_{\text{т.к.}})^2 = 1156 - 3,14 \cdot (10 + 0,02)^2 = 840,7 \text{ см}^2,$$

где S_{ϕ} – площадь фиктивного блока, см^2 .

Площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на 1 элемент:

$$S_{\text{мн}_1} = \frac{S_{\text{т.к.}} - S_{\text{твэл}}}{n} = \frac{314 - 33,56}{19} = 14,76 \text{ см}^2;$$

$$v = \frac{2,56 \cdot 4,712 \cdot 516,6}{3,6 \cdot 1,35 \cdot 11,35 \cdot 14,76 \cdot 7,02} = 1,09 \text{ м/с.}$$

Таким образом, получившаяся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет установленным требованиям ($v < 2,5 \text{ м/с}$ – для жидкометаллического теплоносителя).

Принятые в предварительном тепловом расчёте, размеры твэла, скорость, проходное сечение для теплоносителя, размеры реактора уточняются в результате последующего физического расчёта.

2.2 Расчет концентраций

Поскольку ячейка реактора состоит из нескольких зон с различными ядерными свойствами, необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, коэффициенты диффузии, замедляющие свойства) для каждой зоны (топливо – нитрид урана (2 % обогащения по U^{235}), оболочка – сталь $1X18H9T$, теплоноситель – свинец Pb , замедлитель – графит C).

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

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

где ρ – плотность вещества, г/см³;

A – атомный вес элемента.

2.2.1 Расчет концентрации топлива

Топливом является нитрид урана (UN), обогащенная по U^{235} на 2 %, поэтому ядерная концентрация топлива рассчитывается следующим образом:

$$N_{UN} = \frac{6,023 \cdot \rho_{UN}}{A_{UN}} \cdot 10^{23} = \frac{6,023 \cdot 14,32}{252} \cdot 10^{23} = 3,422 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3.$$

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

$$N_{U^{235}} = \frac{N_{UN} \cdot C_{U^{235}}}{100\%} = \frac{3,422 \cdot 10^{22} \cdot 2}{100} = 6,844 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{U^{238}} = \frac{N_{UN} \cdot C_{U^{238}}}{100\%} = \frac{3,422 \cdot 10^{22} \cdot 98}{100} = 3,353 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_N = \frac{N_{UN} \cdot C_N}{100\%} = \frac{3,422 \cdot 10^{22} \cdot 100}{100} = 3,422 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

2.2.2 Расчет концентрации теплоносителя

Теплоносителем в данном ядерном реакторе служит свинец.

$$N_{Pb} = \frac{6,023 \cdot \rho_{Pb}}{A_{Pb}} \cdot 10^{23} = \frac{6,023 \cdot 11,35}{207} \cdot 10^{23} = 3,302 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

2.2.3 Расчет концентрации оболочки

Оболочка твэлов и технологического канала – сталь (18 % Cr; 1,5 % Mn; 0,8 % Ti; 9 % Ni; 70,7 % Fe). Вычисление концентраций производится следующим образом:

$$N_{Fe} = \frac{6,023 \cdot \rho_{стали} \cdot C_{Fe}}{A_{Fe} \cdot 100\%} \cdot 10^{23} = \frac{6,023 \cdot 7,95 \cdot 70,7}{56 \cdot 100} \cdot 10^{23} = 6,044 \cdot 10^{22}, \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{Cr} = \frac{6,023 \cdot \rho_{стали} \cdot C_{Cr}}{A_{Cr} \cdot 100\%} \cdot 10^{23} = \frac{6,023 \cdot 7,95 \cdot 18}{52 \cdot 100} \cdot 10^{23} = 1,657 \cdot 10^{22}, \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{Ni} = \frac{6,023 \cdot \rho_{стали} \cdot C_{Ni}}{A_{Ni} \cdot 100\%} \cdot 10^{23} = \frac{6,023 \cdot 7,95 \cdot 9}{59 \cdot 100} \cdot 10^{23} = 7,303 \cdot 10^{21}, \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{Ti} = \frac{6,023 \cdot \rho_{стали} \cdot C_{Ti}}{A_{Ti} \cdot 100\%} \cdot 10^{23} = \frac{6,023 \cdot 7,95 \cdot 0,8}{49 \cdot 100} \cdot 10^{23} = 7,979 \cdot 10^{20}, \text{ ядер/см}^3,$$

$$N_{Mn} = \frac{6,023 \cdot \rho_{стали} \cdot C_{Mn}}{A_{Mn} \cdot 100\%} \cdot 10^{23} = \frac{6,023 \cdot 7,95 \cdot 1,5}{55 \cdot 100} \cdot 10^{23} = 1,306 \cdot 10^{21}, \text{ ядер/см}^3.$$

2.2.4 Доли материалов в ячейке

Площадь сечения топлива определяется по формуле:

$$S_{тон} = n \cdot S_{тон.таб.} = n \cdot \pi \cdot \frac{d_{твэл.внутр.}^2}{4} = 19 \cdot 3,14 \cdot \frac{1,45^2}{4} = 31,36 \text{ см}^2.$$

Площадь сечения прохода теплоносителя:

$$S_{тн} = n \cdot S_{тн_1} = 19 \cdot 14,76 = 280,44 \text{ см}^2.$$

Доля топлива:

$$\beta_{\text{мон}} = \frac{S_{\text{мон}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{31,36}{1156} = 0,027.$$

Доля теплоносителя:

$$\beta_{\text{тн}} = \frac{S_{\text{тн}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{280,44}{1156} = 0,243.$$

Доля замедлителя:

$$\beta_{\text{зам.}} = \frac{S_{\text{зам.}}}{S_{\text{яч.}}} = \frac{840,7}{1156} = 0,727.$$

Доля конструкционных материалов:

$$\beta_{\text{к.м.}} = 1 - \beta_{\text{мон.}} - \beta_{\text{тн.}} - \beta_{\text{зам.}} = 1 - 0,027 - 0,243 - 0,727 = 0,003.$$

2.3 Расчет микросечений и макросечений для «холодного» реактора

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

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

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

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

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

$$\sigma_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}; \quad (2.9)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f_0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \quad (2.10)$$

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

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

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

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

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

Замедляющую способность вещества можно оценить по соотношению:

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

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

2.3.1 Микросечения и макросечения для U^{235}

Произведем расчет сечений для температуры нейтронного газа равной:

$$T_{н.г.} = T_{плав.}^{Pb} + 20 = 600 + 20 = 620 \text{ К.}$$

$f_a = 0,939$ – поправочный коэффициент для U^{235} .

$f_f = 0,939$ – поправочный коэффициент для U^{235} .

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

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

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

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,939 \cdot \sqrt{\frac{293}{620}} = 389,74 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,939 \cdot \sqrt{\frac{293}{620}} = 332,1 \text{ барн};$$

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

$$\mu_s^{U^{235}} = 0; \sigma_{tr}^{U^{235}} = 389,74 + 15 \cdot (1 - 0) = 404,74 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 389,74 \cdot 10^{-24} \cdot 6,844 \cdot 10^{20} = 0,267 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 332,1 \cdot 10^{-24} \cdot 6,844 \cdot 10^{20} = 0,227 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 6,844 \cdot 10^{20} = 0,0103 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 404,74 \cdot 10^{-24} \cdot 6,844 \cdot 10^{20} = 0,277 \text{ см}^{-1};$$

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

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0103 = 8,7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.2 Микросечения и макросечения для U^{238}

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

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

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{620}} = 1,65 \text{ барн};$$

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

$$\begin{aligned}
\sigma_s^{U^{238}} &= 9 \text{ барн}; \\
\mu_s^{U^{238}} &= 0; \quad \sigma_{tr}^{U^{238}} = 1,65 + 9 \cdot (1 - 0) = 10,65 \text{ барн}; \\
\Sigma_a^{U^{238}} &= 1,65 \cdot 10^{-24} \cdot 3,353 \cdot 10^{22} = 0,055 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_f^{U^{238}} &= 0 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_s^{U^{238}} &= 9 \cdot 10^{-24} \cdot 3,353 \cdot 10^{22} = 0,302 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_{tr}^{U^{238}} &= 10,65 \cdot 10^{-24} \cdot 3,353 \cdot 10^{22} = 0,357 \text{ см}^{-1}; \\
\xi^{U^{238}} &= \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 8,38 \cdot 10^{-3}; \\
\xi \Sigma_s^{U^{238}} &= 8,38 \cdot 10^{-3} \cdot 0,302 = 2,53 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.
\end{aligned}$$

2.3.3 Микросечения и макросечения для азота

$f_a = 1$ – поправочный коэффициент для N^{14} .

$$\begin{aligned}
\sigma_{a0}^{N^{14}} &= 1,85 \text{ барн}; \\
\sigma_f^{N^{14}} &= 0 \text{ барн}; \\
\sigma_s^{N^{14}} &= 9,8 \text{ барн}; \\
\sigma_a^{N^{14}} &= 1,85 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{620}} = 1,12 \\
\mu_s^{N^{14}} &= 0,05; \quad \sigma_{tr}^{N^{14}} = 1,12 + 9,8 \cdot (1 - 0,05) = 10,43 \text{ барн}; \\
\Sigma_a^{N^{14}} &= 1,12 \cdot 10^{-24} \cdot 3,422 \cdot 10^{22} = 0,038 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_f^{N^{14}} &= 0 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_s^{N^{14}} &= 9,8 \cdot 10^{-24} \cdot 3,422 \cdot 10^{22} = 0,335 \text{ см}^{-1}; \\
\Sigma_{tr}^{N^{14}} &= 10,43 \cdot 10^{-24} \cdot 3,422 \cdot 10^{22} = 0,357 \text{ см}^{-1};
\end{aligned}$$

$$\xi^{N^{14}} = \frac{2}{14 + \frac{2}{3}} = 1,36 \cdot 10^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s^{N^{14}} = 1,36 \cdot 10^{-1} \cdot 0,335 = 0,045 \text{ см}^{-1}.$$

2.3.4 Макросечения для нитрида урана

$$\Sigma_a^{UN} = \Sigma_a^{U^{235}} + \Sigma_a^{U^{238}} + \Sigma_a^{N^{14}} = 0,267 + 0,055 + 0,038 = 0,36 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{UN} = \Sigma_f^{U^{235}} + \Sigma_f^{U^{238}} + \Sigma_f^{N^{14}} = 0,227 + 0 + 0 = 0,227 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{UN} = \Sigma_s^{U^{235}} + \Sigma_s^{U^{238}} + \Sigma_s^{N^{14}} = 0,0103 + 0,302 + 0,335 = 0,647 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{UN} = \Sigma_{tr}^{U^{235}} + \Sigma_{tr}^{U^{238}} + \Sigma_{tr}^{N^{14}} = 0,277 + 0,357 + 0,357 = 0,991 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s^{UN} = \xi \Sigma_s^{U^{235}} + \xi \Sigma_s^{U^{238}} + \xi \Sigma_s^{N^{14}} = 8,7 \cdot 10^{-5} + 2,53 \cdot 10^{-3} + 0,045 = 0,048 \text{ см}^{-1}.$$

2.3.5 Расчет микросечения и макросечения для хрома

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

$$\sigma_a^{Cr^{52}} = 3,1 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{620}} = 1,884 \text{ барн};$$

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

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

$$\mu_s^{Cr^{52}} = 0,01; \sigma_{tr}^{Cr^{52}} = 1,884 + 4,2 \cdot (1 - 0,01) = 6,042 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{Cr^{52}} = 1,884 \cdot 10^{-24} \cdot 1,657 \cdot 10^{22} = 0,031 \text{ см}^{-1};$$

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

$$\Sigma_s^{Cr^{52}} = 4,2 \cdot 10^{-24} \cdot 1,657 \cdot 10^{22} = 0,07 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Cr^{52}} = 6,042 \cdot 10^{-24} \cdot 1,657 \cdot 10^{22} = 0,1 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi_{Cr^{52}} = \frac{2}{52 + \frac{2}{3}} = 3,8 \cdot 10^{-2};$$

$$\xi \Sigma_s^{Cr^{52}} = 3,8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,07 = 2,66 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.6 Расчет микросечения и макросечения для марганца

$f_a = 1$ – поправочный коэффициент для Mn^{55}

$$\sigma_a^{Mn^{55}} = 13,16 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{620}} = 8 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{Mn^{55}} = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{Mn^{55}} = 2,3 \text{ барн};$$

$$\mu_s^{Mn^{55}} = 0,01; \sigma_{tr}^{Mn^{55}} = 8 + 2,3 \cdot (1 - 0,01) = 10,277 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{Mn^{55}} = 8 \cdot 10^{-24} \cdot 1,306 \cdot 10^{21} = 1,05 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{Mn^{55}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{Mn^{55}} = 2,3 \cdot 10^{-24} \cdot 1,306 \cdot 10^{21} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Mn^{55}} = 10,277 \cdot 10^{-24} \cdot 1,306 \cdot 10^{21} = 13,42 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1};$$

$$\xi_{Mn^{55}} = \frac{2}{55 + \frac{2}{3}} = 3,6 \cdot 10^{-2};$$

$$\xi \Sigma_s^{Mn^{55}} = 3,6 \cdot 10^{-2} \cdot 0,003 = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.7 Расчет микросечения и макросечения для титана

$f_a = 1$ – поправочный коэффициент для Ti^{48}

$$\sigma_a^{Ti^{48}} = 5,8 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{620}} = 3,525 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{Ti^{48}} = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{Ti^{48}} = 4,2 \text{ барн};$$

$$\mu_s^{Ti^{48}} = 0,01; \sigma_{tr}^{Ti^{48}} = 3,525 + 4,2 \cdot (1 - 0,01) = 7,683 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{Ti^{48}} = 3,525 \cdot 10^{-24} \cdot 7,979 \cdot 10^{20} = 0,003 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{Ti^{48}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{Ti^{48}} = 4,2 \cdot 10^{-24} \cdot 7,979 \cdot 10^{20} = 0,0034 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Ti^{48}} = 7,683 \cdot 10^{-24} \cdot 7,979 \cdot 10^{20} = 0,006 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi^{Ti^{48}} = \frac{2}{48 + \frac{2}{3}} = 4,11 \cdot 10^{-2};$$

$$\xi \Sigma_s^{Ti^{48}} = 4,11 \cdot 10^{-2} \cdot 0,0034 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

2.3.8 Расчет микросечения и макросечения для никеля

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

$$\sigma_a^{Ni^{59}} = 4,6 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{620}} = 2,76 \text{ барн};$$

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

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

$$\mu_s^{Ni^{59}} = 0,01; \sigma_{tr}^{Ni^{59}} = 2,76 + 17 \cdot (1 - 0,01) = 19,59 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{Ni^{59}} = 2,76 \cdot 10^{-24} \cdot 7,303 \cdot 10^{21} = 0,02 \text{ см}^{-1};$$

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

$$\Sigma_s^{Ni^{59}} = 17 \cdot 10^{-24} \cdot 7,303 \cdot 10^{21} = 0,124 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Ni^{59}} = 19,59 \cdot 10^{-24} \cdot 7,303 \cdot 10^{21} = 0,143 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi_{Ni^{59}} = \frac{2}{59 + \frac{2}{3}} = 3,35 \cdot 10^{-2};$$

$$\xi \Sigma_s^{Ni^{59}} = 3,35 \cdot 10^{-2} \cdot 0,124 = 0,004 \text{ см}^{-1}.$$

2.3.9 Расчет микросечения и макросечения для железа

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

$$\sigma_a^{Fe^{56}} = 2,53 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{620}} = 1,538 \text{ барн};$$

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

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

$$\mu_s^{Fe^{56}} = 0,01; \sigma_{tr}^{Fe^{56}} = 1,538 + 11,4 \cdot (1 - 0,01) = 12,824 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{Fe^{56}} = 1,538 \cdot 10^{-24} \cdot 6,044 \cdot 10^{22} = 0,093 \text{ см}^{-1};$$

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

$$\Sigma_s^{Fe^{56}} = 11,4 \cdot 10^{-24} \cdot 6,044 \cdot 10^{22} = 0,689 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Fe^{56}} = 12,824 \cdot 10^{-24} \cdot 6,044 \cdot 10^{21} = 0,775 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi_{Fe^{56}} = \frac{2}{56 + \frac{2}{3}} = 3,53 \cdot 10^{-2};$$

$$\xi \Sigma_s^{Fe^{56}} = 3,53 \cdot 10^{-2} \cdot 0,689 = 0,024 \text{ см}^{-1}.$$

2.3.10 Расчет макросечения для стали

$$\Sigma_a^{Сталь} = \Sigma_a^{Cr^{52}} + \Sigma_a^{Mn^{55}} + \Sigma_a^{Ti^{48}} + \Sigma_a^{Ni^{59}} + \Sigma_a^{Fe^{56}};$$

$$\Sigma_a^{Сталь} = 0,031 + 0,0105 + 0,003 + 0,02 + 0,093 = 0,1575 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{Сталь} = \Sigma_f^{Cr^{52}} + \Sigma_f^{Mn^{55}} + \Sigma_f^{Ti^{48}} + \Sigma_f^{Ni^{59}} + \Sigma_f^{Fe^{56}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{C_{сталь}} = \Sigma_s^{Cr^{52}} + \Sigma_s^{Mn^{55}} + \Sigma_s^{Ti^{48}} + \Sigma_s^{Ni^{59}} + \Sigma_s^{Fe^{56}};$$

$$\Sigma_s^{C_{сталь}} = 0,07 + 0,003 + 0,0034 + 0,124 + 0,689 = 0,8894 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{C_{сталь}} = \Sigma_{tr}^{Cr^{52}} + \Sigma_{tr}^{Mn^{55}} + \Sigma_{tr}^{Ti^{48}} + \Sigma_{tr}^{Ni^{59}} + \Sigma_{tr}^{Fe^{56}};$$

$$\Sigma_{tr}^{C_{сталь}} = 0,1 + 0,0134 + 0,006 + 0,143 + 0,775 = 1,0374 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s^{C_{сталь}} = \xi \Sigma_s^{Cr^{52}} + \xi \Sigma_s^{Mn^{55}} + \xi \Sigma_s^{Ti^{48}} + \xi \Sigma_s^{Ni^{59}} + \xi \Sigma_s^{Fe^{56}};$$

$$\xi \Sigma_s^{C_{сталь}} = 27 \cdot 10^{-4} + 1,1 \cdot 10^{-4} + 1,4 \cdot 10^{-4} + 0,004 + 0,024 = 0,031 \text{ см}^{-1}.$$

Полученные значения микропараметров представлены в таблице 1, а значения макропараметров в таблице 2.

Таблица 1 – Значения микропараметров и концентраций

Нуклид	σ_{a0}	σ_{f0}	$\bar{\sigma}_a$	$\bar{\sigma}_f$	σ_s	$\bar{\mu}$	σ_{tr}	N, 10^{20} яд ер/см ³	ε
C^{12}	0,004	—	0,002	—	4,7	0,06	4,4	853	0,16
Pb^{207}	0,17	—	0,103	—	11,30	0	11,4	330,2	0,01
N^{14}	1,85	—	1,12	—	9,8	0,05	10,5	342,2	0,14
U^{235}	683	582	389,7	332,1	15,0	0	404,7	6,844	0,01
U^{238}	2,71	—	1,65	—	9,0	0	10,65	335,3	0,01
Fe^{56}	2,53	—	1,54	—	11,4	0,01	12,8	604,4	0,04
Cr^{52}	3,10	—	1,88	—	4,2	0,01	6,03	165,7	0,04
Ni^{59}	4,60	—	2,795	—	17,0	0,01	19,6	73,03	0,03
Ti^{49}	5,80	—	3,52	—	4,2	0,01	7,668	7,979	0,04
Mn^{55}	13,16	—	8,00	—	2,3	0,01	10,269	13,06	0,04

Таблица 2 – Значения макропараметров

Нуклид	Σ_a	Σ_f	Σ_{tr}	$\varepsilon \Sigma_s$	Σ_s
C^{12}	0,00021	—	0,379	0,063	0,401
Pb^{207}	0,009	—	0,377	0,004	0,373
N^{14}	0,038	—	0,358	0,046	0,335
U^{235}	0,267	0,227	0,277	0,0001	0,010
U^{238}	0,055	—	0,357	0,003	0,302
Fe^{56}	0,093	—	0,774	0,024	0,689
Cr^{52}	0,031	—	0,100	0,003	0,070
Ni^{59}	0,02	—	0,142	0,004	0,124
Ti^{49}	0,003	—	0,006	0	0,003
Mn^{55}	0,010	—	0,013	0	0,003
Оболочка	0,158	—	1,037	0,031	0,889
Топливо	0,36	0,227	0,991	0,048	0,647

2.4 Оптимизация параметров ячейки и расчет эффективного коэффициента размножения

2.4.1 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется как произведение четырех сомножителей:

$$k_{\infty} = \eta \mu \varphi \theta , \quad (2.13)$$

где μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;

φ – вероятность избежать резонансного захвата;

θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;

η – коэффициент размножения на тепловых нейтронах в топливе.

Согласно определению η – коэффициент, характеризующий количество вторичных нейтронов деления приходящихся на один поглощенный топливом первичный тепловой нейтрон. Он определяется по формуле:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_f^{\text{топл.}}}{\Sigma_a^{\text{топл.}}} , \quad (2.14)$$

где ν_f – число нейтронов, которое испускается при одном акте деления. Для U^{235} он равен 2,42.

$$\eta = 2,42 \cdot \frac{0,227}{0,36} = 1,53 .$$

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах μ – величина, которая характеризует увеличение числа нейтронов за счет деления быстрыми нейтронами, т.е он учитывает вклад нейтронов деления U^{238} в общее число нейтронов.

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах μ определяется по формуле:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \varepsilon_1 , \quad (2.15)$$

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

ε_1 – пористость блока по U^{238} .

Пористость блока определяется как отношение концентраций U^{238} в топливе и в природном уране: $\varepsilon_1 = \frac{N^{238}}{N_0^{238}}$.

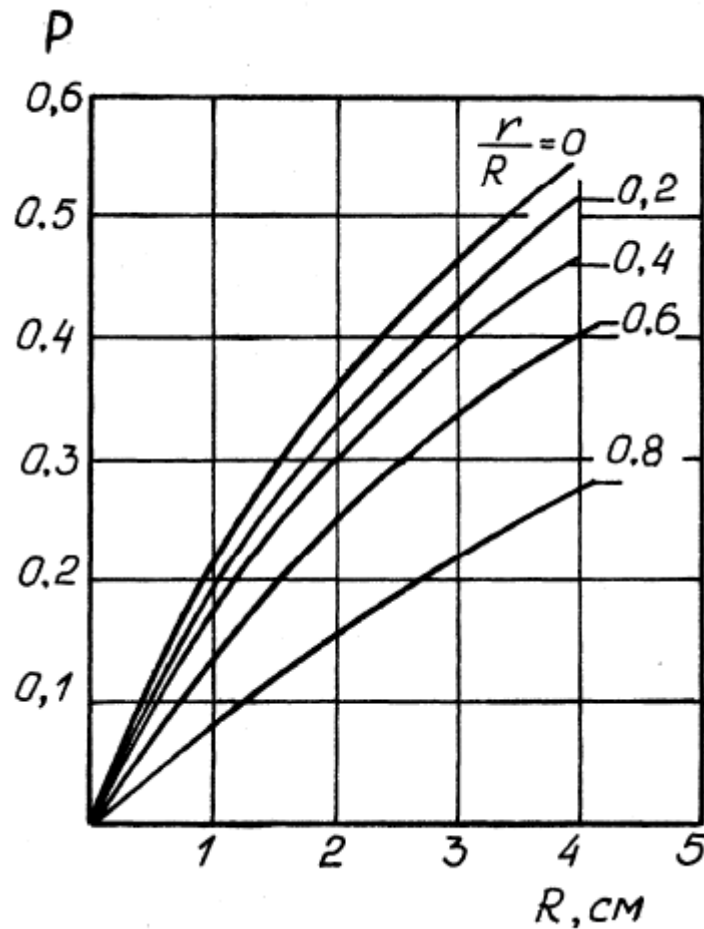


Рисунок 1 – Зависимость вероятности испытать нейтроном столкновения с ядром U^{238} от радиуса блока

Из графика, для $R=0,75$ см, определяем, что P примерно равно 0,13.

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \varepsilon_1 = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \cdot \frac{\frac{\rho_{\text{топл}} \cdot N_A}{M(U^{238})}}{\frac{(1-\omega) \cdot \rho_{\text{прир}} \cdot N_A}{M(U^{238})}} = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,13}{1 - 0,52 \cdot 0,13} \cdot \frac{\frac{14,32}{14+238}}{\frac{(0,9928) \cdot 19,08}{238}} = 1,009$$

Для дальнейшего расчета произведем гомогенизацию ячейки.

Коэффициент использования тепловых нейтронов вычисляется по формуле:

$$\theta = \theta_0 \cdot \theta_{\phi}, \quad (2.16)$$

где θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока;

θ_{ϕ} – отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу тепловых нейтронов.

Макроскопическое сечение поглощения фиктивного блока:

$$\Sigma_a^{\phi} = \frac{\Sigma_a^{\text{обол.}} \cdot S_{\text{обол.}} + \Sigma_a^{\text{топл.}} \cdot S_{\text{топл.}}}{S_{\phi}}, \quad (2.17)$$

где $S_{\text{обол.}}$ – площадь оболочек ТВЭЛОВ и технологического канала.

$$S_{\text{обол.}} = (S_{\phi} - \pi \cdot R_{\text{т.к.}}^2) + \pi \cdot \frac{(d_{\text{тв.внеш.}} - d_{\text{тв.внут.}})^2}{4} = 315,417 - 3,14 \cdot 10^2 +$$

$$3,14 \cdot 19 \cdot \frac{(1,5 - 1,45)^2}{4} = 3,459 \text{ см}^2$$

$$S_{\text{топл.}} = n \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{топл.}}^2}{4} = \frac{19 \cdot 3,14 \cdot 1,45^2}{4} = 31,375 \text{ см}^2$$

$$\Sigma_a^{\phi} = \frac{\Sigma_a^{\text{обол.}} \cdot S_{\text{обол.}} + \Sigma_a^{\text{топл.}} \cdot S_{\text{топл.}}}{S_{\phi}} = \frac{0,158 \cdot 3,459 + 0,36 \cdot 31,375}{315,417} = 0,038 \text{ 1/см.}$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_a^{\text{топл.}} \cdot S_{\text{топл.}}}{\Sigma_a^{\phi} \cdot S_{\phi}}. \quad (2.18)$$

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_a^{\text{топл.}} \cdot S_{\text{топл.}}}{\Sigma_a^{\phi} \cdot S_{\phi}} = \frac{0,36 \cdot 31,375}{0,038 \cdot 315,417} = 0,94$$

Коэффициент θ_{ϕ} вычисляется следующим образом:

$$\theta_{\phi} = (1 + F \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_a^{\text{зам}}}{\Sigma_a^{\phi} \cdot S_{\phi}} + (E - 1))^{-1}, \quad (2.19)$$

где F – коэффициент экранирования;

$S_{\text{зам}}$ – площадь замедлителя, см²;

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

Коэффициент экранирования равен:

$$F = \frac{\Phi_{\text{зам}}}{\Phi_{\phi}} = \frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{I_0(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}})}{I_1(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}})}, \quad (2.20)$$

где R_{ϕ} – радиус фиктивного блока, см;

L_{ϕ} – длина диффузии фиктивного блока, см;

I_0 и I_1 – функции Бесселя 0-го и 1-го порядков.

Фактор $(E - 1)$ вычисляется по формуле:

$$(E - 1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{зам}}}\right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{ф}}} - 0,75\right), \quad (2.21)$$

где $L_{\text{зам}}$ – длина диффузии в замедлителе, см.

$$L_{\text{ф}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{ф}} \cdot \Sigma_{tr}^{\text{ф}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{ф}} \cdot \frac{\Sigma_{tr}^{\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}} + \Sigma_{tr}^{\text{об}} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{ф}}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,038 \cdot \frac{(0,991 \cdot 31,375 + 1,037 \cdot 3,459)}{315,417}}} = 8,94 \text{ см}$$

$$L_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{зам}} \cdot \Sigma_{tr}^{\text{зам}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,00021 \cdot 0,379}} = 65,133 \text{ см}$$

$$R_{\text{ф}} = R_{\text{т.к.}} + \Delta_{\text{т.к.}} = 10 + 0,02 = 10,02 \text{ см}$$

$$S_{\text{зам}} = S_{\text{яч}} - S_{\text{ф}} = a^2 - S_{\text{ф}} = 34^2 - 315,417 = 840,58 \text{ см}^2$$

$$R_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{S_{\text{зам}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{840,58}{3,14}} = 16,36 \text{ см}$$

$$F = \frac{R_{\text{ф}}}{L_{\text{ф}}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_{\text{ф}}}{L_{\text{ф}}}\right)}{I_1\left(\frac{R_{\text{ф}}}{L_{\text{ф}}}\right)} = \frac{10,02}{8,94} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1,336}{0,650} = 1,15$$

$$(E - 1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{зам}}}\right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{ф}}} - 0,75\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{16,36}{65,133}\right)^2 \cdot \left(\ln \frac{16,36}{8,94} - 0,75\right) = -0,005$$

$$\theta_{\text{ф}} = (1 + F \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_a^{\text{зам}}}{\Sigma_a^{\text{ф}} \cdot S_{\text{ф}}} + (E - 1))^{-1} = (1 + 1,16 \cdot \frac{840,58 \cdot 0,00021}{0,038 \cdot 315,417} - 0,005)^{-1} = 0,988$$

$$\theta = 0,988 \cdot 0,94 = 0,93$$

Вероятность избежать резонансного захвата считается по следующей формуле:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{K_T \cdot R_U \cdot \sqrt{R \cdot n \cdot \varepsilon_1} + 0,73 \cdot n \cdot R_U^2 \varepsilon_1}{\varepsilon \Sigma_S^{\text{зам}} S_{\text{зам}}}\right), \quad (2.22)$$

где K_T – температурный коэффициент;

R_U – радиус уранового блока;

R – радиус ТВС.

$$R = \sqrt{\frac{n \cdot S_{\text{ТВЭЛ}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{19 \cdot 3,14 \cdot 1,5^2}{3,14 \cdot 4}} = 3,27 \text{ см}$$

Температура нейтронного газа $T_{\text{н.г.}} = T_{\text{плавл}}^{Pb} + 20 = 620 \text{ К.}$

$$K_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{T_U}) = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{620}) = 1,113$$

$$\varphi = \exp \left(- \frac{1,113 \cdot 0,725 \cdot \sqrt{3,27 \cdot 19 \cdot 0,716} + 0,73 \cdot 19 \cdot 0,725^2 \cdot 0,716}{0,063 \cdot 840,58} \right) = 0,819$$

Коэффициент размножения в бесконечной среде равен:

$$k_{\infty} = \eta \mu \varphi \theta = 1,53 \cdot 1,009 \cdot 0,93 \cdot 0,819 = 1,18$$

2.4.2 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения рассчитывается по формуле:

$$k_{эф} = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau)}{1 + B^2 L^2}, \quad (2.23)$$

где B^2 – геометрический параметр, см^{-2} ;

L – длина диффузии, см;

τ – возраст нейтронов, см^2 .

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H+2\delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R+\delta} \right)^2, \quad (2.24)$$

где δ – эффективная добавка, см.

$$\delta = 1,2 \cdot L_{отр} \cdot th \frac{T}{L_{отр}}, \quad (2.25)$$

где T – толщина отражателя, см;

$L_{отр}$ – длина диффузии отражателя, см.

$$T = 1,5M = 1,5 \cdot \sqrt{L_{отр}^2 + \tau_{отр}} = 1,5 \cdot \sqrt{65,133^2 + 352,03} = 101,67 \text{ см}$$

$$\delta = 1,2 \cdot L_{отр} \cdot th \frac{T}{L_{отр}} = 1,2 \cdot 65,133 \cdot th \frac{101,67}{65,133} = 71,56 \text{ см}$$

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H+2\delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R+\delta} \right)^2 = \left(\frac{3,14}{516,6+2 \cdot 71,56} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{\frac{543,8}{2} + 71,56} \right)^2 = 7,17 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}$$

Длина диффузии для $k_{эф}$ рассчитывается по следующей формуле:

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

$$\Sigma_{tr}^{\phi} = \frac{\Sigma_{tr}^{об} \cdot S_{об} + \Sigma_{tr}^{топл} \cdot S_{топл}}{S_{\phi}} = \frac{1,037 \cdot 3,459 + 0,991 \cdot 31,375}{315,417} = 0,11 \text{ 1/см}$$

$$L^2 = 65,133^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{315,417 \cdot 1}{840,58 \cdot 1,15}\right) \cdot 1156}{\left(1 + \frac{315,417 \cdot 0,11}{840,58 \cdot 0,379}\right) \cdot 840,58} \cdot (1 - 0,988) = 84 \text{ см}^2$$

Возраст нейтронов считается по следующей формуле:

$$\tau = \tau_{\text{зам}} \cdot \left(\frac{S_{\text{яч}}}{S_{\text{зам}}}\right)^2 = 352,03 \cdot \left(\frac{1156}{840,583}\right)^2 = 665,8 \text{ см}^2$$

$$k_{\text{эф}} = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau)}{1 + B^2 L^2} = 1,418 \cdot \frac{\exp(-7,17 \cdot 10^{-5} \cdot 665,8)}{1 + 7,17 \cdot 10^{-5} \cdot 84} = 1,13$$

2.4.3 Оптимизация параметров ячейки

Оптимизация параметров ячейки производится для нахождения наибольшего эффективного коэффициента размножения, производится в 3 этапа. На первом этапе изменяется шаг решётки от которого зависит размер ячейки под ключ при постоянном диаметре твэла. Полученные данные в ходе 1-го шага оптимизации приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Изменение размера под ключ

Параметр	Значение							
Размер ячейки под ключ, см	26	28	30	32	34	45	47	49
Внешний диаметр ТВЭЛа, см	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Диаметр топливной табл, см	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
V, м/с	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
k_{∞}	0,924	1,026	1,098	1,151	1,189	1,272	1,273	1,272
$k_{\text{эф}}$	0,846	0,955	1,031	1,087	1,127	1,206	1,205	1,202

На втором этапе оптимизации при оптимальном значении размера ячейки под ключ изменяется внешний диаметр твэла, изменяя тем самым и диаметр

топливной таблетки. Данные полученные в этом шаге оптимизации приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Изменение внешнего диаметра твэла

Параметр	Значение							
Размер ячейки под ключ, см	45	45	45	45	45	45	45	45
Внешний диаметр ТВЭЛа, см	1,5	1,55	1,6	1,45	1,4	1,35	1,3	1,25
Диаметр топливной табл, см	1,45	1,5	1,55	1,4	1,35	1,3	1,25	1,2
V , м/с	1,09	1,099	1,108	1,081	1,073	1,066	1,058	1,051
k_{∞}	1,272	1,271	1,271	1,272	1,271	1,271	1,269	1,267
$k_{эф}$	1,206	1,204	1,203	1,207	1,208	1,207	1,207	1,206

На третьем этапе меняем радиус технологического канала при постоянном диаметре твэлов и размере ячейки под ключ. Полученные данные приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Изменение радиуса технологического канала

Параметр	Значение					
Размер ячейки под ключ, см	45	45	45	45	45	45
Внешний диаметр ТВЭЛа, см	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Радиус технологического канала, см	10	12	14	16	8	6
V , м/с	1,073	0,723	0,521	0,395	1,780	3,647
k_{∞}	1,271	1,291	1,297	1,287	1,240	1,194
$k_{эф}$	1,208	1,229	1,235	1,221	1,171	1,118

Оптимальными параметрами принимаются параметры при которых эффективный коэффициент размножения будет максимальным и приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Оптимальные параметры ячейки

Размер ячейки под ключ, см	45
Внешний диаметр ТВЭЛа, см	1,4
Диаметр топливной табл, см	1,35
V , м/с	0,521
Радиус технологического канала, см	14
k_{∞}	1,297
$k_{эф}$	1,235

2.5 Температурные эффекты реактивности

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

При повышении температуры повышается температура нейтронного газа, что приводит к уменьшению микроскопических сечений поглощения и деления тепловых нейтронов. Повышение температуры конструктивных элементов приводит к уменьшению их плотности вследствие расширения материалов, что приводит к снижению концентрации и, следовательно, к изменению макроскопических сечений. Повышение температуры нейтронного газа вызывает смещение энергии «сшивки» спектров тепловых и замедляющихся нейтронов в область более высоких энергий, что приводит к уменьшению возраста тепловых нейтронов. Из-за повышения температуры ядерного горючего происходит уширение резонансов горючего вследствие их теплового движения (эффект Доплера).

Все это и ряд других факторов приводит к изменению реактивности реактора. В большинстве случаев температурный эффект отрицателен, и нагрев реактора сопровождается уменьшением эффективного коэффициента размножения, что влечет устойчивую работу реактора. Положительный температурный коэффициент приводит к неустойчивости в работе реактора, при котором его состояние переходит в надкритическое.

Распределение температуры по объему реактора изменяется со временем. Однако для многих практических задач справедливо так называемое квазистационарное приближение, когда с достаточной степенью точности можно считать установившееся поле температур неизменным во времени.

2.5.1 Зависимость поперечных сечений от температуры

Для расчета реактора при рабочей температуре нужно найти эффективную температуру нейтронов и соответствующие ей новые значения сечений и других параметров реактора.

Для стержневых ТВЭЛ при расчете можно принимать, что средняя температура замедлителя равна средней температуре теплоносителя:

$$T_{\text{зам}} = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2} = \frac{300 + 480}{2} = 390 \text{ }^{\circ}\text{C} = 663 \text{ K}.$$

Тогда эффективная температура нейтронного газа ($T_{\text{н.г.}}^{\text{эф}}$, К) определится по формуле:

$$T_{\text{н.г.}}^{\text{эф}} = T_{\text{зам}} \left(1 + 1,4 \frac{\bar{\Sigma}_a \text{ яч}}{(\xi \Sigma_s) \text{ яч}} \right), \quad (2.27)$$

где макросечение поглощения и замедляющая способность берутся при средней температуре замедлителя.

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

$$(\xi \Sigma_s)_{яч} = \frac{1}{S_{яч}} \cdot (S_{зам} \cdot (\xi \Sigma_s)_C + S_{мон} \cdot (\xi \Sigma_s)_{UN} + S_{Pb} \cdot (\xi \Sigma_s)_{Pb} + S_{об} \cdot (\xi \Sigma_s)_{об}) =$$

$$= \frac{1}{2025} \cdot (1407,487 \cdot 0,063 + 380,563 \cdot 0,051 + 227,616 \cdot 0,00359 + 6,1 \cdot 0,0314) = 0,045 \text{ см}^{-1};$$

$$\frac{\Sigma_{аяч}}{\Sigma_{яч}} = \frac{S_{зам} \cdot \Sigma_a^C + \frac{1}{F} (S_{монл} \cdot \Sigma_a^{мон} + S_{T/н} \cdot \Sigma_a^{Pb} + S_{об} \cdot \Sigma_a^{об})}{S_{зам} + \frac{1}{F} \cdot (S_{монл} + S_{T/н} + S_{об})} =$$

$$= \frac{1407,487 \cdot 0,000201 + 0,204 \cdot (380,563 \cdot 0,349 + 227,616 \cdot 0,0033 + 6,100 \cdot 0,1530)}{1407,487 + 0,204 \cdot (380,563 + 227,616 + 6,100)} = 0,0057 \text{ см}^{-1}.$$

Искомая эффективная температура нейтронного газа (5.1):

$$T_{н.г.}^{эф} = 663 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{0,0057}{0,045} \right) = 778,94 \text{ К}.$$

Микроскопические сечения поглощения и деления пересчитываются для найденной величины температуры нейтронного газа по соотношениям:

$$\sigma_a(T_{н.г.}) = 0,886 \cdot \sigma_{a0} \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}} f_a(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{гр}), \quad (2.28)$$

$$\sigma_f(T_{н.г.}) = 0,886 \cdot \sigma_{f0} \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}} f_f(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{гр}), \quad (2.29)$$

где $f_a = f_f = 0,939$.

Так как верхняя граница спектра тепловых нейтронов условно ограничена величиной $E_{гр}$ – энергией сшивки, при которой спектр Максвелла переходит в спектр Ферми, то необходимо добавить множитель $F(\chi_{гр})$, где $\chi_{гр} = E_{гр} / E_m$, ($E_m = kT_{н.г.}$) определяется подбором или графически из следующего трансцендентного уравнения:

$$f(\chi_{сп}) = \frac{\chi_{сп}^2 \cdot e^{-\chi_{сп}}}{1 - (1 + \chi_{сп}) \cdot e^{-\chi_{сп}}} = \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s} = \frac{0,0057}{0,045} = 0,12 \quad (2.30)$$

Данной величине $f(\chi_{гр})$ соответствует $\chi_{гр} = 6,5$ из рисунка 1.

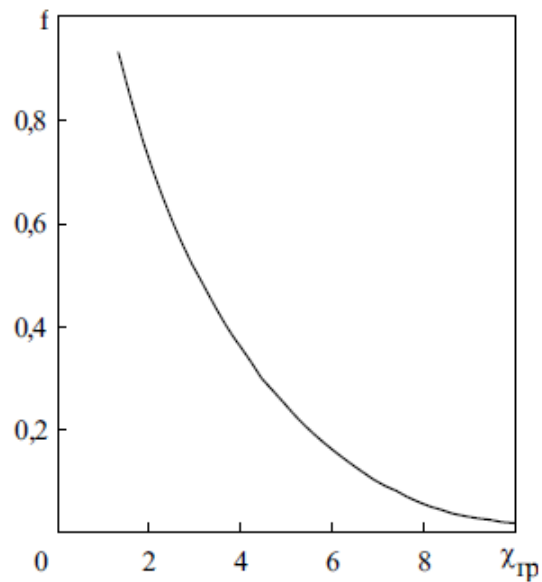


Рисунок 2 – К определению верхней границы тепловой группы

Сравним эту величину с величиной полученной при помощи рисунка 3.

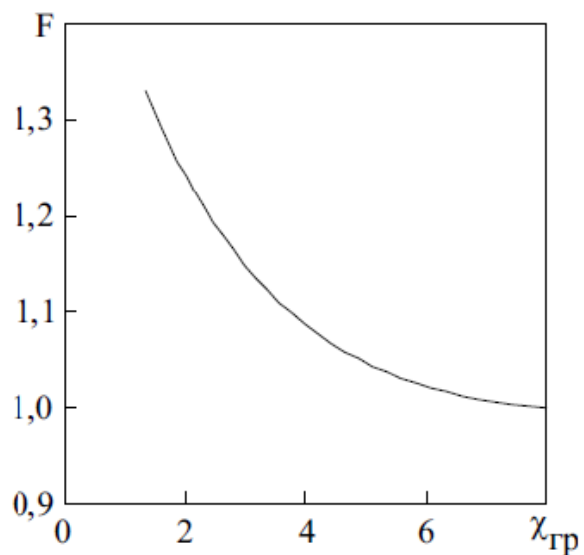


Рисунок 3 – Усредненное сечение поглощения по спектру Максвелла

Так как из рисунка 3 наблюдается несущественное изменение величины $\chi_{гр}$ которой соответствует значение $F = 1,02$.

Пересчитаем микросечения с поправкой $F = 1,02$.

Таблица 7 – Микроскопические сечения

Нуклид	σ_{a0}	σ_{f0}	$\overline{\sigma_a}$	$\overline{\sigma_f}$	σ_s	$\overline{\mu}$	σ_{tr}
C^{12}	0,004	-	0,00193	-	4,7	0,056	4,4408
Pb^{207}	0,170	-	0,08222	-	11,30	0,003	11,3458
N^{14}	1,85	-	0,89470	-	9,8	0,048	10,2280
U^{235}	683	582	330,31482	281,5	15,0	0,003	345,2723
U^{238}	2,71	-	1,31062	-	9,0	0,003	10,2854
Fe^{56}	2,53	-	1,22357	-	11,4	0,012	12,4879
Cr^{52}	3,10	-	1,49923	-	4,2	0,013	5,6454
Ni^{59}	4,60	-	2,22467	-	17,0	0,011	19,0326
Ti^{49}	5,80	-	2,80502	-	4,2	0,014	6,9479
Mn^{55}	13,16	-	6,36448	-	2,3	0,012	8,6366

2.5.2 Коэффициент размножения «горячего» реактора

Для расчета коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде «горячего» реактора также используется формула четырех сомножителей:

$$k_{\infty}^{\text{гор}} = \eta_{\text{гор}} \varepsilon_{\text{гор}} \phi_{\text{гор}} \theta_{\text{гор}}.$$

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

$$k_{\text{эф}}^{\text{гор}} = \frac{k_{\infty}^{\text{гор}} e^{-B^2 \tau_{p \text{ гор}}}}{1 + B^2 L_{p \text{ гор}}^2}.$$

Квадрат длины диффузии $L_{\text{гор}}^2$ необходимо пересчитать, умножив значение для «холодного» реактора на соответствующую температурную поправку:

$$L_{\text{гор}}^2(T) = L_{\text{хол}}^2(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,48}, \quad (2.31)$$

где $T_0 = 620 \text{ K}$ – температура для «холодного» реактора;

$T = 663 \text{ K}$ – средняя температура замедлителя;

$L_{\text{хол}}^2$ – квадрат длины диффузии в замедлителе для «холодного» реактора.

Тогда:

$$L_{зам\,гор}^2 = L_{зам}^2(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0,48} = 4242,283 \cdot \left(\frac{663}{620}\right)^{0,48} = 4381,049 \text{ см}^2,$$

$$L_{зам}^{гор} = 66,19 \text{ см}.$$

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

$$\tau_{гор} = \tau_{хол} - \frac{1}{3 \cdot \overline{\xi \Sigma_{s\,яч}} \cdot \overline{\Sigma_{tr\,яч}}} \cdot \ln \frac{T_{H.G.}}{T_0}, \quad (2.32)$$

где $\tau_{хол}$ – возраст нейтронов в «холодном» реакторе, см²;

$T_{H.G.}$ – температура нейтронов «горячего» реактора, К;

$T_0 = 620 \text{ К}$ – температура для «холодного» реактора;

$\overline{\xi \Sigma_{s\,яч}}$ – усредненная по ячейки замедляющая способность для «горячего» реактора, см⁻¹;

$\overline{\Sigma_{tr\,яч}}$ – усредненное по ячейки транспортное макросечение для «горячего» реактора, см⁻¹.

$$\begin{aligned} \tau_{гор} &= \tau_{хол} - \frac{1}{3 \overline{\xi \Sigma_{s\,яч}} \cdot \overline{\Sigma_{tr\,яч}}} \cdot \ln \frac{T_{H.G.}}{T_0} = \\ &= 665 - \frac{1}{3 \cdot 0,045 \cdot 0,407} \cdot \ln \frac{663}{620} = 655,5 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Значение геометрического параметра для «горячего» реактора рассчитывается по аналогии с расчетом для «холодного» и имеет значение

$$B^2 = 0,0000832 \text{ см}^{-2}.$$

Окончательно, эффективный коэффициент размножения «горячего» реактора:

$$k_{эф}^{гор} = \frac{k_{\infty}^{гор} e^{-B^2 \cdot \tau_{гор}}}{1 + B^2 L_{гор}^2} = \frac{1,242 \cdot \exp(-0,000083 \cdot 721,027)}{1 + 0,000083 \cdot 86,3} = 1,16.$$

Определяем температурный коэффициент реактивности:

$$\alpha = \frac{\Delta k_{эфф}}{\Delta T} = \frac{k_{эфф}^{зор} - k_{эфф}^{хол}}{\Delta T} = \frac{1,16 - 1,235}{663 - 620} = -0,0017 \text{ K}^{-1}.$$

Температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \frac{k_{эфф}^{зор} - k_{эфф}^{хол}}{k_{эфф}^{зор} \cdot k_{эфф}^{хол}} = \frac{1,16 - 1,235}{1,16 \cdot 1,235} = -0,052.$$

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

2.6 Многогрупповой расчет, спектр и ценности нейтронов в активной зоне

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

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

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

Предполагается, что для каждой группы могут быть рассмотрено односкоростное кинетическое уравнение в диффузионно-возрастном приближении и сопряженное ему уравнение ценностей нейтронов, описывающее баланс нейтронов и ценностей в объеме реактора. Приведенный многогрупповой расчет спектра нейтронов позволяет в дальнейшем получить эффективные двухгрупповые константы.

В дальнейшем будет принята следующая система обозначений:

m – общее число энергетических групп;

k, i, j – текущий индекс группы;

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

D – коэффициент диффузии нейтронов, см;

Σ_a, Σ_f – макроскопические сечения поглощения и деления, см^{-1} , причем для делящегося изотопа $\Sigma_a = \Sigma_f + \Sigma_c$;

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

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

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

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

2.6.1 Пересчет концентраций

Пересчет концентраций для многогруппового расчета производится по формуле:

$$N_i = N_j \cdot \beta_j, \quad (2.33)$$

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

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

Приведем доли элементов:

$$\beta_{\text{зам}} = 0,695 - \text{доля замедлителя};$$

$$\beta_{T/H} = 0,290 - \text{доля теплоносителя};$$

$$\beta_{\text{топ}} = 0,13 - \text{доля топлива};$$

$$\beta_{\text{ст}} = 0,002 - \text{доля конструкционных материалов.}$$

Тогда, с учетом долей всех составляющих ячейки, произведем расчет концентраций по формуле (6.1).

$$N_C = N_C \cdot \beta_{\text{зам}} = 8,53 \cdot 10^{22} \cdot 0,695 = 5,93 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3,$$

$$\begin{aligned}
N_{Fe} &= N_{Fe} \cdot \beta_{cm} = 6,04 \cdot 10^{22} \cdot 0,002 = 1,2 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3, \\
N_{Cr} &= N_{Cr} \cdot \beta_{cm} = 1,66 \cdot 10^{22} \cdot 0,002 = 3,32 \cdot 10^{19} \text{ ядер/см}^3, \\
N_{Ni} &= N_{Ni} \cdot \beta_{cm} = 7,3 \cdot 10^{21} \cdot 0,002 = 1,46 \cdot 10^{19} \text{ ядер/см}^3, \\
N_{Ti} &= N_{Ti} \cdot \beta_{cm} = 7,98 \cdot 10^{20} \cdot 0,002 = 1,6 \cdot 10^{18} \text{ ядер/см}^3, \\
N_{Mn} &= N_{Mn} \cdot \beta_{cm} = 1,31 \cdot 10^{21} \cdot 0,002 = 2,62 \cdot 10^{18} \text{ ядер/см}^3, \\
N_{Pb} &= N_{Pb} \cdot \beta_{T/H} = 3,3 \cdot 10^{22} \cdot 0,29 = 9,57 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3, \\
N_{U-235} &= N_{U-235} \cdot \beta_{mon} = 6,84 \cdot 10^{20} \cdot 0,13 = 8,9 \cdot 10^{19} \text{ ядер/см}^3, \\
N_{U-238} &= N_{U-238} \cdot \beta_{mon} = 3,35 \cdot 10^{22} \cdot 0,13 = 4,4 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3, \\
N_N &= N_N \cdot \beta_{mon} = 3,42 \cdot 10^{22} \cdot 0,13 = 4,44 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.
\end{aligned}$$

2.6.2 Многогрупповой расчет

Для каждого элемента рассчитываем:

$$\Sigma_a^k = N_i \cdot (\sigma_c^k + \sigma_f^k), \text{ см}^{-1}, \quad (2.34)$$

где N_i – ядерная концентрация;

σ_c – сечение захвата;

σ_f – сечение деления.

$$\Sigma_z^k = N_i \cdot (\sigma_{z(e)}^k + \sigma_{in}^k - \sigma_{in}^{kk}), \text{ см}^{-1}, \quad (2.35)$$

где σ_k^{in} – сечение неупругого рассеяния при переходе в k -ю группу;

σ_{in}^{kk} – сечение неупругого рассеяния не вызывающее ухода из этой группы.

$$\Sigma_{tr}^k = N_i \cdot (\sigma_e^k \cdot (1 - \mu_e) + \sigma_f^k + \sigma_{in}^k + \sigma_c^k), \text{ см}^{-1}, \quad (2.36)$$

где σ_e^k – сечение упругого рассеяния;

μ_e – средний косинус угла рассеяния.

$$\Sigma_f^k = N_i \cdot \sigma_f^k \text{ см}^{-1}, \quad (2.37)$$

$$\Sigma_{y\theta}^k = \Sigma_a^k + \Sigma_z^k \text{ см}^{-1}, \quad (2.38)$$

$$\Sigma^{i \rightarrow i+1} = N_i \cdot (\sigma_{z(e)}^k + \sigma_{in(i,i+1)}^k) \text{ см}^{-1}, \text{ при } k = i + 1, \quad (2.39)$$

$$\Sigma^{i \rightarrow i+k} = N_i \cdot \sigma_{in(i,i+k)}^k \text{ см}^{-1}, \text{ при } k > i + 1, \quad (2.40)$$

где $\sigma_{3(e)}^k$ – сечение упругого замедления из i -й группы в k -ю.

Кроме того, учитываем поправку на самоэкранировку:

$$\sigma_{0l} = \frac{\sum_{i=1}^{m \neq l} \sigma_{ti} \cdot N_i}{N_l}, \text{ барн}, \quad (2.41)$$

где σ_{ti}, N_i – сечения и ядерная концентрация « i » элемента.

После определения σ_0 отыскиваем поправки к сечениям f_i . С учетом поправок находим $\sigma_i = \sigma_i \cdot f(\sigma_0)$.

В качестве примера определения констант приведем 4-ю группу:

Для определения поправки на самоэкранировку U^{238} рассчитаем σ_0 .

Таблица 8 – Значения σ_0

Элемент	Значение σ_0 , барн
C ¹²	1,5
Pb ²⁰⁷	48,5
Fe ⁵⁶	881,9
Cr ⁵²	3225,2
Ni ⁵⁹	7324,7
U ²³⁵	1607,5
U ²³⁸	25,3
N ¹⁴	30,7
Ti ⁴⁹	67066,6
Mn ⁵⁵	40983,8

Поправки f_t, f_c, f_e для 4 группы равны 1.

Определим уход из группы:

За счет замедления:

N :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,405 + 0 - 0 = 0,405 \text{ барн},$$

U^{235} :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,026 + 1,76 - 0,2 = 1,586 \text{ барн.}$$

U^{238} :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,029 + 2,25 - 0,14 = 2,139 \text{ барн,}$$

Fe :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,102 + 0,9 - 0,15 = 0,852 \text{ барн,}$$

Mn :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,122 + 0,92 - 0,23 = 0,812 \text{ барн,}$$

Cr :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,11 + 0,73 - 0,01 = 0,83 \text{ барн,}$$

Ni :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,105 + 0,5 - 0 = 0,605 \text{ барн,}$$

Ti :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,129 + 0,55 - 0,03 = 0,649 \text{ барн,}$$

C :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,474 + 0 - 0 = 0,474 \text{ барн,}$$

Pb :

$$\sigma_3^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{3(in)}^4 = \sigma_{3(e)}^4 + \sigma_{in}^4 - \sigma_{in(4,4)}^4 = 0,062 + 0,55 - 0,15 = 0,462 \text{ барн.}$$

$$\sum_3^4 = \sum_{3N}^4 + \sum_{3U5}^4 + \sum_{3U8}^4 + \sum_{3Fe}^4 + \sum_{3C}^4 + \sum_{3Ni}^4 + \sum_{3Cr}^4 + \sum_{3Mn}^4 + \sum_{3Ti}^4 + \sum_{3Pb}^4 = 0,322 \frac{1}{\text{см}}$$

За счет поглощения:

N :

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0,085 + 0 = 0,085 \text{ барн,}$$

U^{235} :

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0,06 + 1,28 = 1,34 \text{ барн.}$$

U^{238} :

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0,06 + 0,49 = 0,55 \text{ барн,}$$

Fe :

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0,003 + 0 = 0,003 \text{ барн},$$

Mn:

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0,0018 + 0 = 0,0018 \text{ барн},$$

Cr:

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0,003 + 0 = 0,003 \text{ барн},$$

Ni:

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0,072 + 0 = 0,072 \text{ барн},$$

Ti:

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0,002 + 0 = 0,002 \text{ барн},$$

C:

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0 + 0 = 0 \text{ барн},$$

Pb:

$$\sigma_a^4 = \sigma_c^4 + \sigma_f^4 = 0,001 + 0 = 0,001 \text{ барн}.$$

$$\Sigma_a^4 = \Sigma_{aN}^4 + \Sigma_{aU5}^4 + \Sigma_{aU8}^4 + \Sigma_{aFe}^4 + \Sigma_{aC}^4 + \Sigma_{aNi}^4 + \Sigma_{aCr}^4 + \Sigma_{aMn}^4 + \Sigma_{aTi}^4 + \Sigma_{aPb}^4 = 0,004 \frac{1}{\text{см}}$$

Транспортные параметры:

N:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 1,8 \cdot (1 - 0,13) + 0,085 + 0 + 0 = 1,703 \text{ барн},$$

U²³⁵:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 3,9 \cdot (1 - 0,55) + 0,06 + 1,28 + 1,76 = 4,855 \text{ барн},$$

U²³⁸:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 4,3 \cdot (1 - 0,53) + 0,06 + 0,49 + 2,25 = 4,821 \text{ барн},$$

Fe:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 2,4 \cdot (1 - 0,32) + 0,003 + 0 + 0,9 = 2,486 \text{ барн},$$

Mn:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 2,53 \cdot (1 - 0,28) + 0,0018 + 0 + 0,92 = 2,739 \text{ барн},$$

Cr:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 2,37 \cdot (1 - 0,32) + 0,003 + 0 + 0,73 = 2,345 \text{ барн},$$

Ni:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 2,53 \cdot (1 - 0,3) + 0,72 + 0 + 0,5 = 2,973 \text{ барн},$$

Ti:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 2,95 \cdot (1 - 0,4) + 0,002 + 0 + 0,55 = 2,322 \text{ барн},$$

C:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 1,8 \cdot (1 - 0,11) + 0 + 0 + 0 = 1,602 \text{ барн},$$

Pb:

$$\sigma_{tr}^4 = \sigma_e^4 \cdot (1 - \mu_e^4) + \sigma_c^4 + \sigma_f^4 + \sigma_{in}^4 = 5,35 \cdot (1 - 0,31) + 0,001 + 0 + 0,55 = 4,243 \text{ барн}.$$

В результате для 4-й группы:

$$\sum_{tr}^4 = \sum_{trN}^4 + \sum_{trU5}^4 + \sum_{trU8}^4 + \sum_{trFe}^4 + \sum_{trC}^4 + \sum_{trNi}^4 + \sum_{trCr}^4 + \sum_{trMn}^4 + \sum_{trTi}^4 + \sum_{trPb}^4 = 0,138 \frac{1}{\text{см}}$$

Тогда:
$$D_4 = \frac{1}{3 \cdot \sum_{tr}^4} = \frac{1}{3 \cdot 0,138} = 2,419 \text{ см}.$$

Результаты сведены в таблицу «многогрупповые константы».

Рассчитаем поток и ценность для 4-й группы:

$$I_4 = \frac{\varepsilon_4 + \sum_3^{1 \rightarrow 4} \cdot I_1 + \sum_3^{2 \rightarrow 4} \cdot I_2 + \sum_3^{3 \rightarrow 4} \cdot I_3}{-B^2 \cdot D_4 + \sum_a^4 + \sum_3^4} =$$

$$\frac{0,27 + 0,096 \cdot 0,035 + 0,061 \cdot 0,205 + 0,283 \cdot 0,535}{1,11 \cdot 10^{-4} \cdot 2,419 + 0,0042 + 0,322} = 1,341,$$

$$I_4^+ = \frac{\nu_f^4 \cdot \sum_f^4 + \sum_{i=5}^{26} \sum_3^{4 \rightarrow i} \cdot I_i^+}{B^2 \cdot D_4 + \sum_a^4 + \sum_3^4} = \frac{0,369}{1,11 \cdot 10^{-4} \cdot 2,419 + 0,0042 + 0,322} = 1,133.$$

При расчете потоков и ценностей учитываются переходы нейтронов в различные группы. Проверка потоков сводится к проверке условия $K_{эф} = K_{эф}^+$, т.е.

$$\sum_{j=1}^m \nu_f^j \cdot \sum_f^j \cdot I_j = \sum_{j=1}^m \varepsilon_j \cdot I_j^+.$$

Проверка показала:

$$\sum_{j=1}^m \nu_f^j \cdot \Sigma_f^j \cdot I_j = 1,137,$$

$$\sum_{j=1}^m \varepsilon_j \cdot I_j^+ = 1,14.$$

Это означает, что $K_{\text{эф}} = K_{\text{эф}}^+$. Следовательно, все значения потоков и ценностей нейтронов в активной зоне были рассчитаны верно.

2.6.3 Определение параметров двугруппового расчета

Рассчитанные спектры потоков и ценностей нейтронов в активной зоне позволяют составить константы для последующего расчета пространственного распределения нейтронных потоков.

При этом выделяется тепловая группа – последняя группа, а все остальные группы объединяются в одну группу быстрых нейтронов, т.е. соответствующие потоки и ценности определяются так:

$$I_T = I_{26} \quad I_T^+ = I_{26}^+,$$

$$I_{\sigma} = \sum_{i=1}^{25} I_i \quad I_{\sigma}^+ = \sum_{i=1}^{25} I_i^+$$

и они составили:

$$I_T = I_{26} = 10,7; \quad I_T^+ = I_{26}^+ = 1,52;$$

$$I_{\sigma} = \sum_{i=1}^{25} I_i = 43,76; \quad I_{\sigma}^+ = \sum_{i=1}^{25} I_i^+ = 30,7.$$

Усредненные константы рассчитываются по формулам:

$$D_{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{25} D_i \cdot I_i \cdot I_i^+}{\sum_{i=1}^{25} I_i \cdot I_i^+} = 0,98 \text{ см};$$

$$\sum_{y8}^{\delta} = \frac{\sum_{k=1}^{25} I_k^+ \cdot \left[(\sum_a^k + \sum_s^k) \cdot I_k - \sum_{j=1}^{k-1} \sum_3^{jk} \cdot I_j \right]}{\sum_{i=1}^{25} I_i \cdot I_i^+} = 0,28;$$

$$\left(\nu_f \cdot \sum_f \right)_T = \nu_f^{26} \cdot \sum_f^{26} = 0,089; \quad \left(\nu_f \cdot \sum_f \right)_{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{25} \nu_f^i \cdot \sum_f^i \cdot I_i \cdot I_i^+}{\sum_{i=1}^{25} I_i \cdot I_i^+} = 0,025;$$

$$\tau = \frac{D_{\delta}}{\sum_{y8}^{\delta} - \left(\nu_f \cdot \sum_f \right)_{\delta}} = 86,3 \text{ см}^2; \quad L^2 = \frac{D_T}{\sum_{aT}} = 655 \text{ см}^2.$$

2.7 Расчет нуклидного состава ядерного топлива реактора

Целью исследований, проводимых в рамках настоящей работы является построение модели кинетики изотопного состава облученного ядерного топлива реактора типа УГР с помощью разработанного программного продукта.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- формирование цепочек ядерных превращений, возникающих при радиоактивном распаде и взаимодействии с нейтронами продуктов (осколков) реакции деления и трансурановых элементов;
- разработка моделей, описывающих изменение нуклидного состава с учетом спектров нейтронов и энергетических распределений в сечениях взаимодействия;
- разработка программных средств для подготовки константного обеспечения;
- расчет отравления реактора с помощью разработанного программного продукта и с помощью известных соотношений;
- сравнение полученных результатов.

2.7.1 Цепочки ядерных превращений в облученном ядерном топливе

Под цепочками ядерных превращений будем понимать взаимосвязи между нуклидами, образующимися в топливе, за счет радиоактивного распада, изомерных переходов и нейтронных реакций. Для целей построения цепочек рассматривались только основные виды радиоактивного распада: β^- -распад; β^+ -распад; β^- -распад, сопровождающийся испусканием запаздывающего нейтрона, а также изомерные переходы. Влияние α -распада учитывалось только при уменьшении концентрации α -излучателя (если период полураспада $< 10^6$ лет) без установления взаимосвязей с дочерними элементами. Такое приближение является достаточно корректным, так как период полураспада относительно α -распада много больше кампании топлива для большинства образующихся нуклидов.

При построении взаимосвязей, обусловленных нейтронными реакциями, учитывалась только реакция радиационного захвата. Полагали, что реакции с образованием тяжелых частиц, являющихся пороговыми, маловероятны для нуклидов-осколков реакции деления и трансурановых элементов. Влияние реакции деления учитывалось при уменьшении концентрации делящихся ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , а также в качестве источника образования нуклидов-осколков в соответствии с данными о независимых выходах.

2.7.2 Построение цепочек ядерных превращений

Следуя общепринятой системе обозначений, далее для обозначения нуклидов введем сигнатуру $Z-A-I$, где Z – заряд ядра нуклида, A – массовое число и I – индекс изомера («g» или отсутствует – основное состояние, «m» – первое возбужденное состояние, «n» – второе, «p» – третье и т.д.).

В общем случае задача построения цепочек ядерных превращений формулируется следующим образом: для заданного радионуклида $(Z-A-I)_0$ найти

все нуклиды, которые образуются в процессе его распада и при его взаимодействии с нейтроном.

С математической точки зрения цепочка представляет собой направленный граф. Вершинами графа являются составляющие цепочку нуклиды, а ребра соответствуют ядерным реакциям. В цепочках (графах), обусловленных только радиоактивным распадом, граф имеет одну исходную вершину. В нашем случае «исходных» вершин может быть большое количество (все нуклиды, имеющие вероятность образования в реакции деления) и само понятие «исходного» не применимо, вследствие большого многообразия взаимосвязей. Ребра графа направлены от материнского нуклида к дочернему и строятся так, чтобы не образовывали циклы. Тогда в рассматриваемом графе всегда существует только один маршрут от любой вершины до любой конечной точки, которой всегда будет являться стабильный изотоп [5].

Задача построения цепочки ядерных превращений является задачей построения данного направленного графа.

Алгоритм решения этой задачи носит рекуррентный характер. Пусть необходимо построить цепочку распада нуклида $Z-A-I$. Каждый шаг рекурсии включает в себя следующие пункты:

1. Цепочка ядерных превращений начинает строиться с самого легкого нуклида с наименьшим зарядом, имеющим вероятность образования в реакции деления.

2. Далее рассматриваются все нуклиды с текущим Z по мере возрастания атомной массы.

- 2.1. Если нуклид нестабильный, то по данным о типах его распада строится список дочерних (для данного) нуклидов.

- 2.2. Если нуклид стабильный, то необходимо смотреть, образуется ли данный нуклид при β^+ -распаде из нуклида с атомной массой $A+1$ или его изомера, в противном случае выполняется переход пункту 1, при $Z+1$.

В результате построения цепочки ядерных превращений формируется список вершин графа, каждая из которых имеет связи только с

предшествующими по списку вершинами. Для каждого из элементов списка также формируется перечень номеров всех его предшественников, образующий матрицу взаимосвязей нуклидов цепочки.

Таблица 9 – Матрица взаимосвязей нуклидов цепочки

Изотоп	0	1	2	3	4	...
0	0	0	0	0	0	...
1	1	0	0	0	0	...
2	1	1	0	0	0	...
3	1	0	1	0	0	...
4	1	0	1	1	0	...
...	...	...	...	...	...	...

Например, для пяти изотопов (где «0»-ым индексом обозначен ^{235}U) матрицы взаимосвязей, приведенной в таблице 2.1, можно установить, что все изотопы цепочки образуются в результате деления. Изотоп с индексом «2» образуется из изотопа с индексом «1»; «3» - из «2»; «4» - из «2» и «3».

Тогда первый (линейный) список устанавливает последовательность расчета концентраций. Второй список (матрица взаимосвязей) определяет источники образования для каждого изотопа первого списка.

2.7.3 Подготовка ядерно-физических данных

Для построения цепочек ядерных превращений и для выполнения расчетов кинетики накопления и выгорания изотопов в топливе в процессе эксплуатации необходимы следующие ядерно-физические параметры:

- период полураспада;
- вероятность каналов распада;
- микроскопические сечения нейтронных реакций;
- резонансные интегралы нейтронных реакций;
- выходы изотопов в реакции деления ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu .

Существует большое число библиотек, экспериментальных, теоретических и оцененных ядерно-физических данных. Такие библиотеки

формируются ведущими научно-исследовательскими центрами всех стран, ведущих разработки в области использования атомной энергии.

Параметры ядерных реакций, свойства радиоактивных изотопов и другие необходимые ядерно-физические параметры могут быть получены из различных баз данных, например Experimental nuclear reaction data (EXFOR), Evaluated nuclear reaction libraries (ENDF), Japanese Evaluated Nuclear Data Library (JENDL), Российская библиотека файлов оцененных нейтронных данных (РОСФОНД) и многих других. В открытом доступе наиболее полный объем информации может быть получен на официальном сайте МАГАТЭ. Удобный ресурс (JANIS 3.2) для поиска необходимой информации предоставляет сайт Агентства по атомной энергии (Nuclear Energy Agency, NEA) Организации экономического сотрудничества и развития (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD). МАГАТЭ рекомендует использовать для продуктов реакции деления ядерно-физические данные из библиотеки ENDF/B-VII.

В целях решения задачи в рамках настоящей работы создана база данных, содержащая информацию о ядерно-физических параметрах порядка 1000 нуклидов, основанная на данных библиотеки ENDF/B-VII (по состоянию на декабрь 2010 года из источника JANIS 3.2).

Отличие созданной базы данных от широко распространенных карт нуклидов, справочников и компьютерных систем состоит в том, что оцененные базы данных ядерно-физических констант объединены с комплексом программ, дающих возможность:

- автоматического построения цепочек ядерных превращений;
- расчета концентрации ядер как для всей цепочки в целом, так и для отдельных входящих в нее нуклидов.

2.7.4 Модель накопления изотопов в облученном ядерном топливе

Рассмотрим кинетику накопления изотопов в составе облученного ядерного топлива. При формировании цепочек ядерных превращений не учитывали

протекание пороговых реакций (n, p), (n, α) и (n, 2n). Также пренебрегали вкладом в накопление продуктов деления ^{238}U быстрыми нейтронами. Для получения сечений нейтронных реакций использовали двухгрупповое приближение:

$$\sigma = \sigma^T + \gamma I; \quad (2.42)$$

где σ^T – сечение в тепловой области; I – резонансный интеграл;

$$\gamma = \frac{\Phi^B}{\Phi^T} \text{ – жесткость спектра;}$$

Φ^B и Φ^T – потоки быстрых и тепловых нейтронов соответственно.

При рассмотрении накопления актиноидов, образующихся в результате активации исходных ^{235}U и ^{238}U , α -распад учитывали только в убыли концентрации данного ядра. Прибылью в результате α -распада пренебрегали.

Изменение каждого i -го изотопа (N_i), входящего в цепочки ядерных превращений, определяется скоростями убыли и прибыли при радиоактивном распаде, изомерном переходе, в нейтронных реакциях и при выходе в реакции деления

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i N_i - \sigma_i^a \Phi N_i + \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_{ji} N_j + \sum_{j=1}^{i-1} \sigma_{ji}^c \Phi N_j + \delta_i^5 \sigma_{U^5}^f \Phi N_{U^5}; \quad (2.43)$$

где λ_i – постоянная распада i -го изотопа;

σ_i^a – полное сечение поглощения нейтронов i -го изотопа;

λ_{ij} – постоянная распада j -го изотопа в i -ое ядро

σ_{ij}^c – сечение нейтронной реакции на j -ом изотопе, приводящее к образованию i -го ядра

δ_i^5 – выход i -го изотопа в реакции деления на ^{235}U

$\sigma_{U^5}^f$ – сечение деления ^{235}U .

Начальные условия в общем случае имеют вид:

$$N(t=0) = N_{0i} \quad (2.44)$$

Система уравнений (2.43) является общей как для описания кинетики накопления продуктов деления, так и для расчета изменений концентраций

тяжелых актиноидов. В последнем случае слагаемое, описывающее выход в реакции деления, исключается. Задачи накопления продуктов деления и актиноидов могут решаться, как независимые. Возможно также и совместное решение, что важно при учете вклада ^{239}Pu в накоплении осколков. Для этого в уравнения системы (2.43) необходимо добавить слагаемое вида $\delta_i^9 \sigma_{\text{Pu}^9}^f \Phi N_{\text{Pu}^9}$.

Для формирования системы уравнений (2.43) на этапе построения графа последовательно пронумеровали все изотопы цепочек ядерных превращений ($i=1, 2, \dots, I$), так, чтобы все j -ые предшественники i -го изотопа имели меньший индекс. При такой последовательной нумерации ^{235}U и его физические параметры задавались с индексом $i = 0$. Переобозначив постоянные коэффициенты уравнений системы (2.43):

$$\lambda_i^* = \lambda_i + \sigma_i^a \Phi;$$

$$\lambda_{ji}^* = \lambda_{ji} + \sigma_{ji}^a \Phi;$$

$$\lambda_{0i}^* = \delta_i^5 \sigma_{U^5}^f \Phi;$$

$$N_0 = N_{U^5}$$

получим

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i^* N_i + \sum_{j=0}^{i-1} \lambda_{ji}^* N_j \quad (2.45)$$

Если искать решение системы уравнений (2.45) в виде:

$$N_i = a_{ii} E_i + \sum_{j=0}^{i-1} a_{ij} E_j; \quad (2.46)$$

где $E_i = \exp(-\lambda_i^* t)$, то неоднородную часть каждого i -го уравнения можно записать как:

$$\sum_{j=0}^{i-1} N_j = \sum_{j=0}^{i-1} \left[E_j \sum_{k=j}^{i-1} \lambda_{kj}^* a_{ik} \right] \quad (2.47)$$

Соответственно первое слагаемое в решении (2.46) $N_i^{(i)} = a_{ii} E_i$ – общее решение однородного уравнения

$$\frac{dN_i^{(i)}}{dt} + \lambda_i^* N_i^{(i)} = 0, \quad (2.48)$$

а остальные слагаемые $N_i^{(j)} = a_{ij} E_j$ – частные решения неоднородного уравнения

$$\frac{dN_i^{(j)}}{dt} + \lambda_i^* N_i^{(j)} = E_j \sum_{k=j}^{i-1} \lambda_{kj}^* a_{ik} \quad (2.49)$$

Окончательно, вектор-столбец концентраций изотопов цепочки ядерных превращений будет определяться, как произведение матрицы коэффициентов a_{ij} на вектор-столбец функций E_i .

$$N_i = A_{ij} E_j; \quad (2.50)$$

$$\begin{pmatrix} N_0 \\ N_1 \\ N_2 \\ \dots \\ N_{I-2} \\ N_{I-1} \\ N_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{00} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_{10} & a_{11} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{I-2,0} & a_{I-2,1} & a_{I-2,2} & \dots & a_{I-2,I-2} & 0 & 0 \\ a_{I-1,0} & a_{I-1,1} & a_{I-1,2} & \dots & a_{I-1,I-2} & a_{I-1,I-1} & 0 \\ a_{I,0} & a_{I,1} & a_{I,2} & \dots & a_{I,I-2} & a_{I,I-1} & a_{I,I} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_{I-2} \\ E_{I-1} \\ E_I \end{pmatrix}$$

Коэффициенты матрицы A_i определяем при решении уравнений (2.47), (2.48) и начальных условий (2.44).

Система уравнений (2.49) имеет следующее аналитическое решение:

$$\begin{cases} N_i = \sum_{j=0}^i a_{ij} E_j; \\ a_{ij} = \frac{\sum_{k=j}^{i-1} \lambda_{ki}^* a_{ik}}{\lambda_i^* - \lambda_j^*}, \quad \text{при } i < j \\ a_{ii} = N_{0i} - \sum_{k=0}^{i-1} a_{ik}; \\ a_{ij} = 0, \quad \text{при } i > j \end{cases} \quad (2.51)$$

Сведения о структуре изобарных цепочек и генетических связей между ядрами при нейтронном облучении выбирались из разработанной базы данных.

Расчет концентраций нуклидов, образующихся при облучении ядерного топлива, включает два этапа. Во-первых, необходимо вычислить физические постоянные, входящие в процесс образования нуклидов (скорости реакций с учетом сечений, резонансных интегралов, нейтронного потока и спектра). Во-вторых, при известных скоростях реакций решить уравнения кинетики и получить концентрации нуклидов.

В общем случае скорости реакций превращений нуклидов меняются во времени. Поэтому приходится комбинировать расчет из этих двух этапов: сначала находятся при начальных значениях концентраций нуклидов скорости реакций. Затем при найденных скоростях реакции определяются концентрации нуклидов из решения уравнений кинетики; далее при новых значениях концентраций определяются новые значения скоростей реакций и т. д.

Для нахождения скоростей реакций необходимо знание усредненных по спектру нейтронов сечений взаимодействия нейтронов с ядрами. В свою очередь, для нахождения спектра нейтронов требуется решить пространственно-энергетическую задачу для критического реактора. Такая задача не рассматривалась в рамках настоящей работы.

2.8 Расчет отравления реактора

2.8.1 Расчет отравления реактора с помощью разработанного программного продукта

Проведем расчет отравления реактора с помощью разработанного программного продукта. Расчет производится на основе известных данных: начальной концентрации урана в загрузенном топливе, обогащении топлива, средней плотности потока нейтронов, заданного времени облучения и жесткости спектра. Графики полученных зависимостей концентрация Xe, I, Pm, Sm представлены ниже.

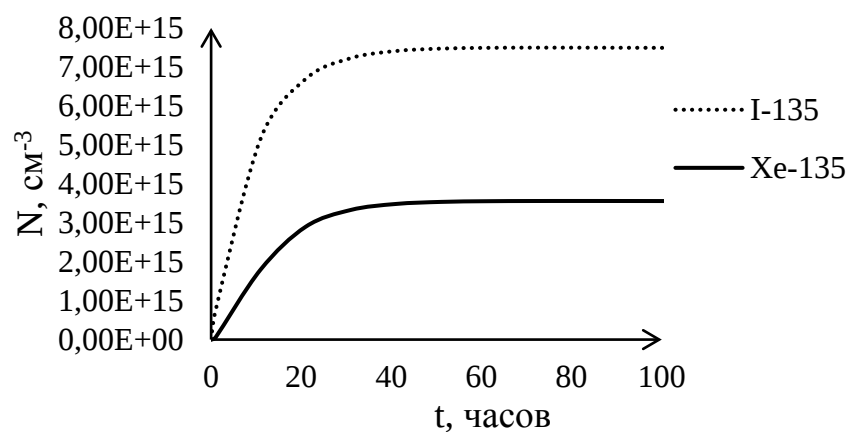


Рисунок 4 – Накопление I и Xe при пуске реактора с жесткостью спектра равной 0

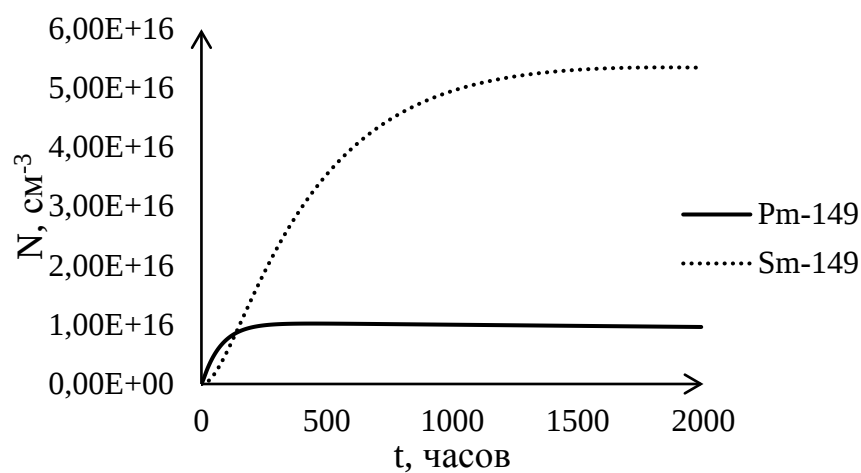


Рисунок 5 – Накопление Pm и Sm при пуске реактора с жесткостью спектра равной 0

Рассмотрим также зависимости параметров отравления реактора от жесткости спектра. Зададим интервал жесткостей от 0 до 1. Полученные зависимости представлены на рисунках 6 и 7.

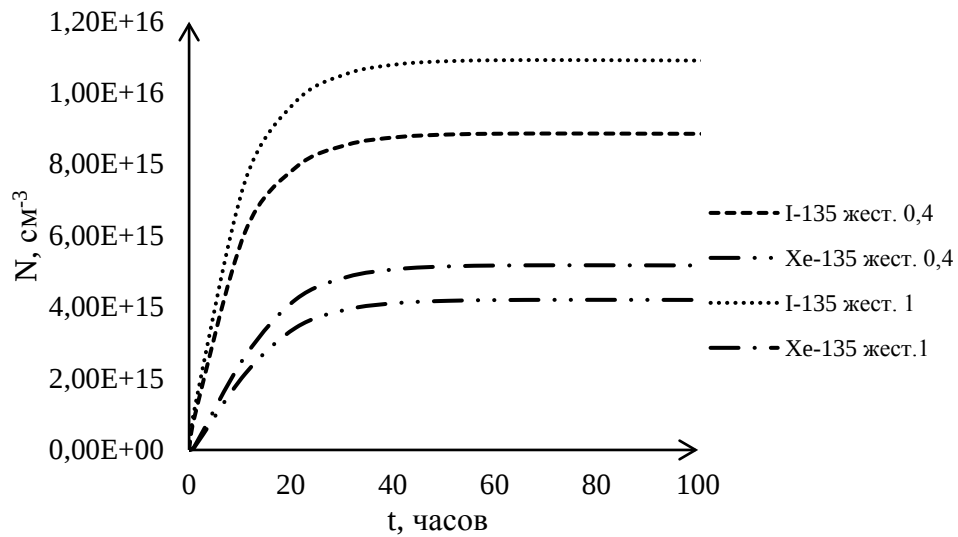


Рисунок 6 – Зависимость накопление I и Xe при пуске реактора от жесткости спектра

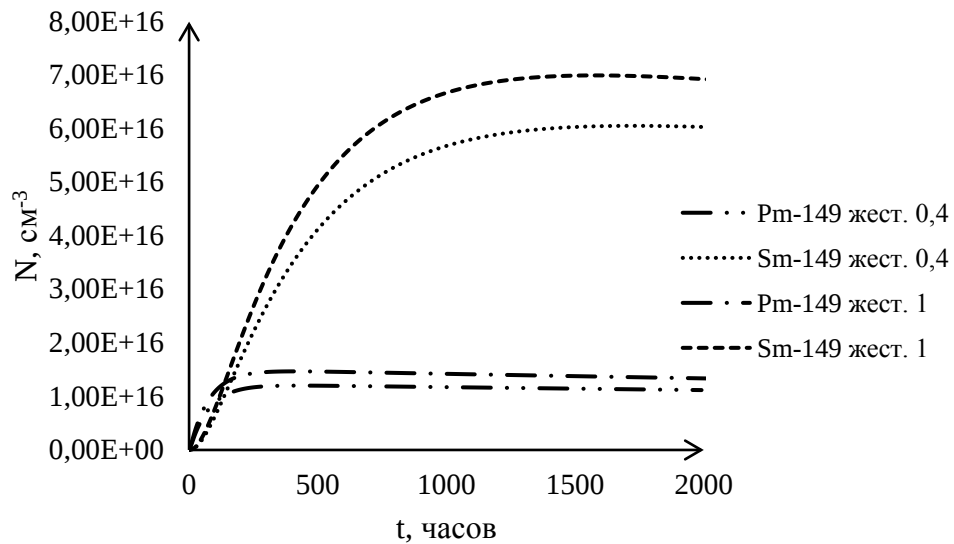


Рисунок 7 – Зависимость накопление Pm и Sm при пуске реактора от жесткости спектра

2.8.2 Расчет отравления реактора по известным соотношениям

Произведем сравнительный расчет отравления реактора с помощью известных соотношений.

Для определения равновесной концентрации Xe и I воспользуемся следующими соотношениями:

$$N_I^{cm} = \frac{\omega_I \Sigma_f \Phi}{\lambda_I} \quad (2.52)$$

$$N_{Xe}^{cm} = \frac{(\omega_I + \omega_{Xe}) \Sigma_f \Phi}{\lambda_{Xe} + \Phi \sigma_{Xe}} \quad (2.53)$$

Определим среднюю плотность потока Φ по объему активной зоны:

$$\Phi = \frac{P}{V_{mon} Q_f} = \frac{P}{n_{твс} S_{пучка} H_{аз}} \quad (2.54)$$

$n_{твс} = 19$ штук, $S_{пучка} = 29,25 \text{ см}^2$, $H_{аз} = 516,6 \text{ см}$. Определим количество ТВС:

$$n_{твс} = \frac{V_{аз}}{V_{яч}} = \frac{V_{аз}}{S_{яч} H_{аз}} = \frac{1,2 \cdot 10^8}{2025 \cdot 516,6} = 115$$

$$\Phi = \frac{P}{V_{mon} Q_f} = \frac{P}{n_{твс} S_{пучка} H_{аз} Q_f} = \frac{900 \cdot 10^6}{115 \cdot 29,25 \cdot 516,6 \cdot 3,2 \cdot 10^{-11}} = 1,62 \cdot 10^{13} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$$

$$N_I^{cm} = \frac{\omega_I \Sigma_f \Phi}{\lambda_I} = \frac{0,056 \cdot 0,227 \cdot 1,62 \cdot 10^{13}}{2,87 \cdot 10^{-5}} = 7,18 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$N_{Xe}^{cm} = \frac{(\omega_I + \omega_{Xe}) \Sigma_f \Phi}{\lambda_{Xe} + \Phi \sigma_{Xe}} = \frac{(0,056 + 0,003) \cdot 0,227 \cdot 1,62 \cdot 10^{13}}{2,09 \cdot 10^{-5} + 1,62 \cdot 10^{13} \cdot 2,07 \cdot 10^{-18}} = 3,99 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

До достижения равновесного состояния концентрации Xe и I изменяются по законам:

$$N_I(t) = N_I^{cm} \cdot (1 - e^{-\lambda_I \cdot t}) \quad (2.55)$$

$$N_{Xe}(t) = N_{Xe}^{cm} \cdot (1 - e^{-(\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}) \cdot t}) - \frac{N_I^{cm}}{(\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}) / \lambda_I - 1} \cdot (e^{-\lambda_I \cdot t} - e^{-(\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}) \cdot t}) \quad (2.56)$$

Графики процессов изменения концентраций ксенона и йода приведены на рисунке 8.

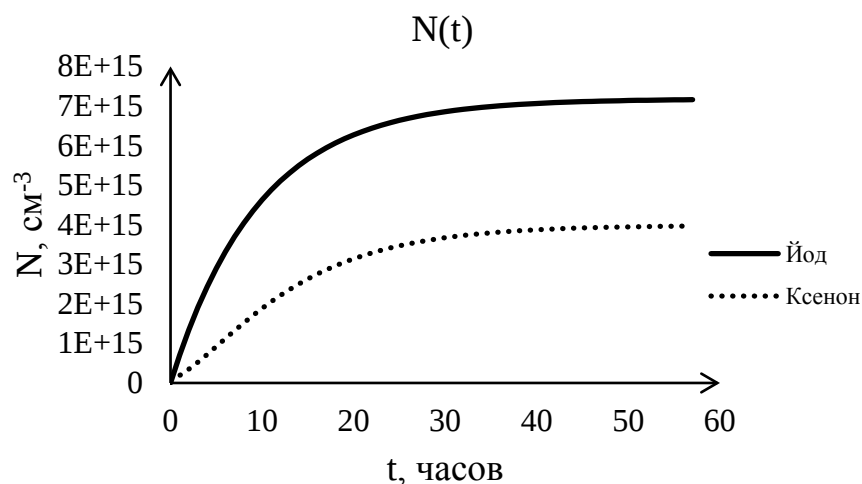


Рисунок 8 – Накопление I и Xe при пуске реактора

Время достижения равновесной концентрации для Xe составило:

$$t(90\%N_{Xe}^{cm}) \approx 30 \text{ ч}$$

Время достижения равновесной концентрации для I составило:

$$t(90\%N_I^{cm}) \approx 28 \text{ ч}$$

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

$$\rho_{Xe}(t) = -\theta q_{Xe}(t) = -\frac{\sigma_a^{Xe}}{\Sigma_{mon}} N_{Xe}(t) \quad (2.57)$$

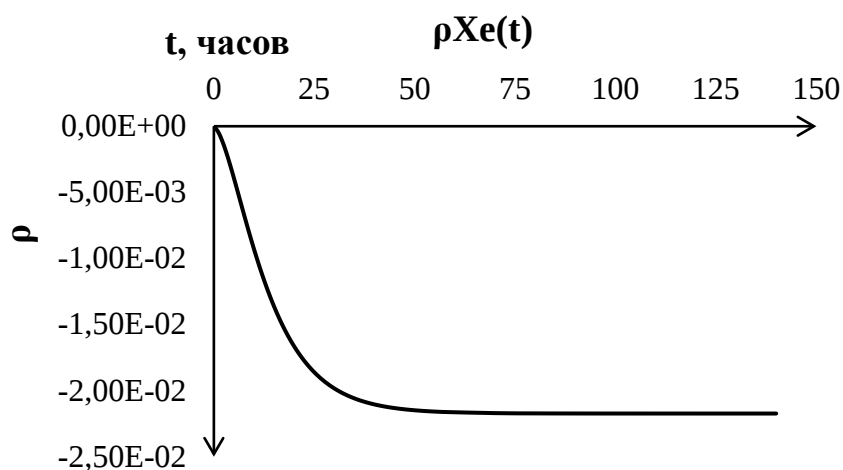


Рисунок 9 – Зависимость реактивности, внесенной Xe, от времени

После остановки или снижения мощности ядерного реактора происходят временное увеличение концентрации Xe вследствие распада I и уменьшение

выгорания Хе. После останова реактора, концентрации I и Хе будут определяться из следующих соотношений:

$$N_I(t) = N_I^{cm} \cdot e^{-\lambda_I \cdot t}, \quad (2.58)$$

$$N_{Xe}(t) = N_{Xe}^{cm} \cdot e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} + \frac{N_I^{cm}}{\frac{\lambda_{Xe}}{\lambda_I} - 1} \cdot \left[-e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} + e^{-\lambda_I \cdot t} \right] \quad (2.59)$$

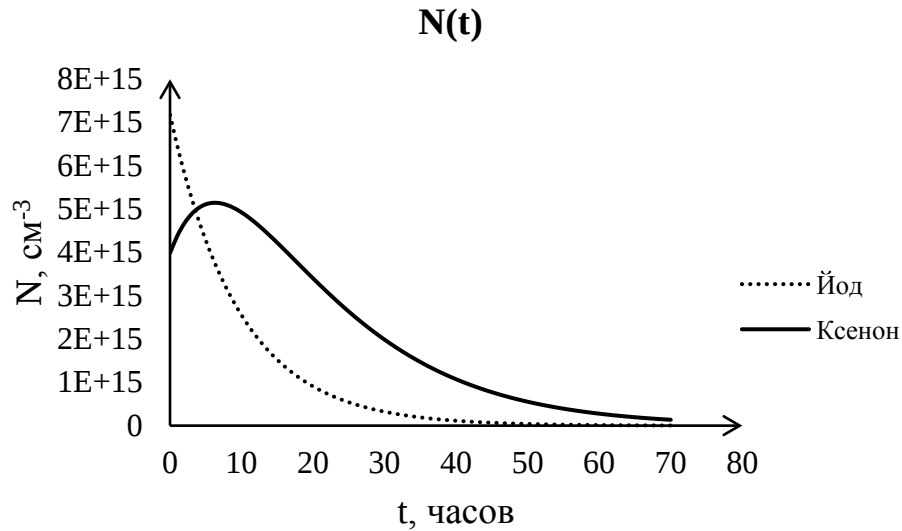


Рисунок – 10 Зависимость концентраций Хе и I от времени после останова реактора

Изменение реактивности после остановки реактора:

$$\rho_{Xe}^{cm} = -\theta \frac{\sigma_a^{Xe}}{\Sigma_a^{mon}} N_{Xe}^{cm} = -0,948 \cdot \frac{2,07 \cdot 10^{-18}}{0,36} \cdot 3,99 \cdot 10^{15} = -2,17 \cdot 10^{-2}$$

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{Xe}^{cm} \cdot \left[\frac{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} - \lambda_I} \cdot (e^{-\lambda_I \cdot t} - e^{-\lambda_{Xe} \cdot t}) + e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} \right] \quad (2.60)$$

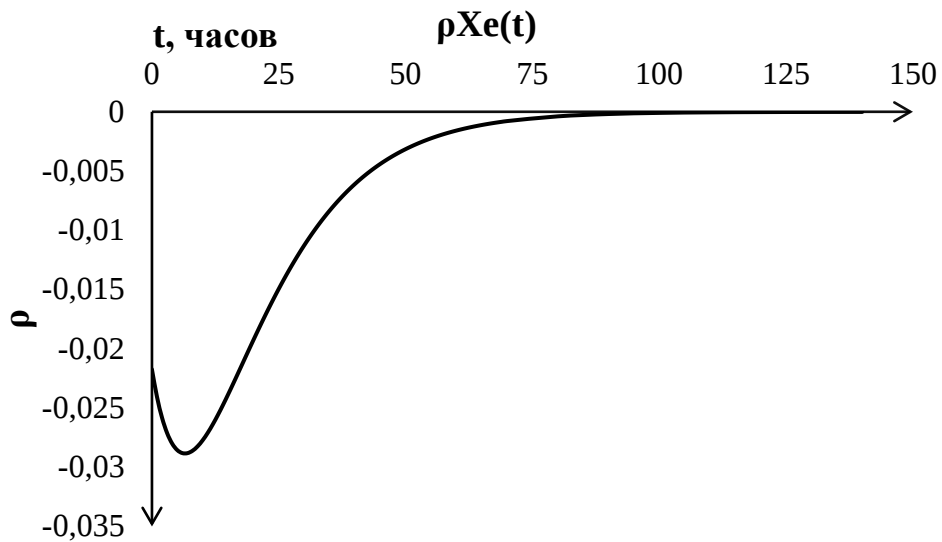


Рисунок 11 – Переотравление ядерного реактора после его останова

Максимальная глубина йодной ямы $\rho_{Xe}^{\max} = 2,88 \cdot 10^{-2}$

Время наступления йодной ямы:

$$t_{\max}^{\text{йя}} = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \ln \left[\frac{\lambda_I}{\lambda_{Xe}} \cdot \frac{\lambda_{Xe} + \Phi \sigma_{Xe}}{\lambda_I + \Phi \sigma_{Xe}} \right] = 6,5 \text{ часа}$$

Определим стационарные концентрации Pm и Sm.

$$N_{Pm}^{cm} = \frac{\omega_{Pm} \Sigma_f \Phi}{\lambda_{Pm}} = \frac{0,014}{4,01 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,227 \cdot 1,62 \cdot 10^{13} = 1,29 \cdot 10^{16}$$

$$N_{Sm}^{cm} = \frac{\omega_{Sm} \Sigma_f}{\sigma_{aSm}} = \frac{0,014}{12,3 \cdot 10^{-20}} \cdot 0,227 = 2,58 \cdot 10^{16}$$

Определим динамику изменения концентраций Pm и Sm, исходя из уравнений:

$$N_{Pm}(t) = N_{Pm}^{cm} (1 - e^{-\lambda_{Pm} t}) \quad (2.61)$$

$$N_{Sm}(t) = \frac{\omega_{Pm} \Sigma_f}{\sigma_{aSm}} \cdot (1 - e^{-\sigma_{aSm} \Phi t}) + \frac{\omega_{Pm} \Sigma_f \Phi}{\lambda_{Pm} - \sigma_{aSm} \Phi} \cdot (e^{-\lambda_{Pm} t} - e^{-\sigma_{aSm} \Phi t}) \quad (2.62)$$

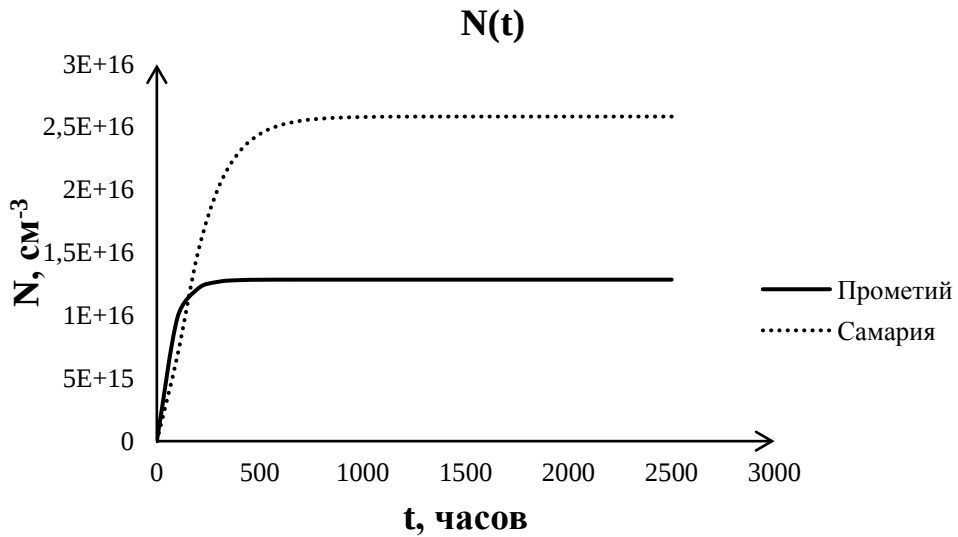


Рисунок 12 – Накопление Рm и Sm при пуске реактора

Время достижения равновесной концентрации для Рm составило:

$$t(90\%N_{Pm}^{cm}) = 200 \text{ ч}$$

Время достижения равновесной концентрации для Sm составило:

$$t(90\%N_{Sm}^{cm}) = 500 \text{ ч}$$

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

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

$$\rho_{Sm}^{cm} = -\theta \frac{\omega_{Pm}\Sigma_f}{\Sigma_a} = -0,948 \frac{0,014 \cdot 0,227}{0,36} = -8,37 \cdot 10^{-3}$$

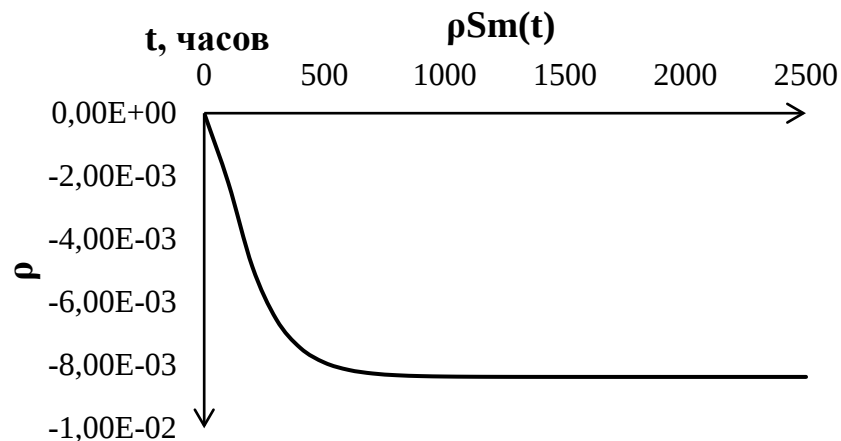


Рисунок 13 – Зависимость реактивности, внесенной Sm, от времени

После останова реактора, концентрации Pm и Sm будут определяться из следующих соотношений:

$$N_{Pm}(t) = N_{Pm}^{cm} \cdot e^{-\lambda_{Pm} \cdot t} \quad (2.63)$$

$$N_{Sm}(t) = N_{Sm}^{cm} + N_{Pm}^{cm} \cdot [1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}] \quad (2.64)$$

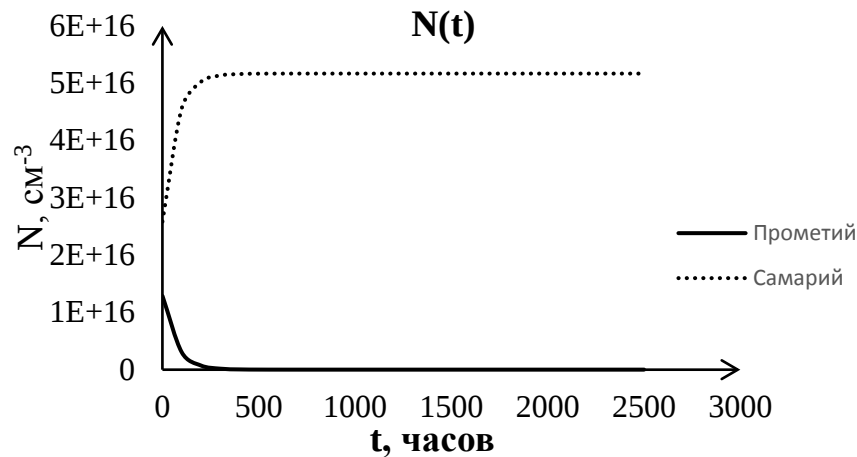


Рисунок – 14 Зависимость концентраций Pm и Sm от времени после останова реактора

Потеря реактивности при прометиевом провале определяется следующим образом:

$$\rho_{n.n.} = \rho_{Sm}^{cm} + \rho_{Sm}^{cm} \frac{\sigma_{Sm}}{\lambda_{Pm}} \Phi [1 - e^{-\lambda_{Pm} t}] = -8,37 \cdot 10^{-3} - 8,37 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{12,3 \cdot 10^{-20}}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,2 \cdot 10^{13} \cdot [1 - e^{-4 \cdot 10^{-6} \cdot t}]$$

Характер изменения реактивности, внесенной Sm после останова реактора представлен на рисунке 13.

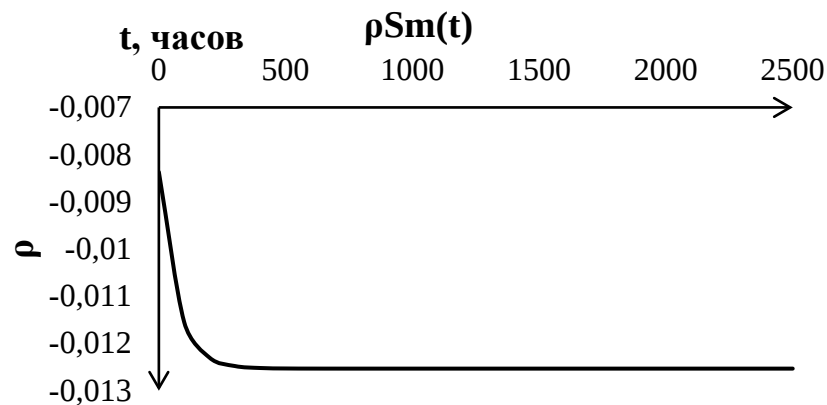


Рисунок 15 – Изменение реактивности, внесенной Sm после полного останова реактора

2.8.3 Сравнение полученных результатов

Сравнение зависимостей накопления рассмотренных нуклидов при пуске реактора показывает, что по порядку величины значения концентраций нуклидов, рассчитанные с помощью разработанной программы, соответствуют значениям, полученным при оценочном расчете по известным соотношениям.

При увеличении жесткости спектра нейтронов от 0 до 1 значения стационарных концентраций рассмотренных нуклидов увеличивается, вследствие учета деления ядерного горючего нейтронами резонансных энергий.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

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

В ходе выполнения данной работы были определены различные нейтронно-физические параметры ЯЭУ, которая предназначена для производства электроэнергии. Разработка ЯЭУ в силу своей специфики будет иметь своим целевым рынком госкорпорации по атомной энергетике. Примером могут служить такие госкорпорации как Росэнергоатом (Россия), Минэнерго (Беларусь), Энергоатом (Украина) и т.п.

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

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

Рисунок 16 – Карта сегментирования рынка услуг по ЯЭУ

Необходимость для стран с низким развитием атомной энергетики ядерных установок с малыми и средними мощностями, говорит о том, что в стране энергетика в целом может быть как на низком, так и на достаточно высоком уровне. Развитие атомной энергетики могло идти как параллельно развитию традиционной энергетики страны, так и опираясь на огромную базу развития. Аналогична ситуация для стран со средним уровнем развития атомной энергетики.

3.2 Анализ конкурентных технических решений

В ходе выполнения данной работы был рассмотрен уран-графитовый канальный реактор на тепловых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, конкурентами которого в принципе будут являться любые ЯЭУ, эксплуатирующиеся с теми же целями что и разрабатываемая, но основными из них, в том числе имеющие близкие технические решения, принимаемые для достижения поставленной цели, будут: водо-водяной корпусный энергетический реактор с водяным теплоносителем (ВВЭР) отечественной разработки, уран-графитовый канальный реактор с водяным теплоносителем (РБМК) отечественной разработки.

Наиболее подходящими для сравнения являются ЯЭУ отечественных разработок, т.к. Россия является одной из лидирующих стран по уровню развития атомной энергетики и именно отечественные разработки востребованы на российском рынке атомной энергии. Основными конкурентами для сравнения являются корпусный водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР) и канальный уран-графитовый реактор с водяным теплоносителем (РБМК). Оценочная карта анализа представлена в таблице 10. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (55)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 10 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{k1}	B_{k2}	K_{ϕ}	K_k	K_{k2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Стоимость топлива в зависимости от обогащения по изотопу U^{235} .	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
2. Стоимость замедлителя	0,04	4	4	5	0,16	0,16	0,2
3. Возможность перегрузки топлива без останова реактора	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
4. Необходимость более высокого давления теплоносителя, а следовательно оборудования для его создания	0,04	5	5	4	0,2	0,2	0,16
5. Глубина выгорания и возможность её увеличения	0,15	4	4	4	0,6	0,6	0,6
7. Удобство в эксплуатации	0,05	3	3	5	0,15	0,15	0,25
9. Надежность	0,15	4	4	5	0,6	0,6	0,75
10. Уровень шума	0,01	4	4	4	0,04	0,04	0,04
11. Безопасность	0,2	4	4	5			
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,01	4	4	5	0,04	0,04	0,05
2. Уровень проникновения на рынок	0,01	1	4	5	0,01	0,04	0,05
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
4. Послепродажное обслуживание	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5
Итого	1	51	53	55	3,3	3,29	3,42

Отметим, что цены, которые предприятия, вероятно, будут платить за поставку уранового коцнтрата, составляют только одну треть стоимости

топлива, загруженного в ядерный реактор. Остальное – это, главным образом, стоимость обогащения.

Выше представлен анализ конкурентоспособности ЯЭУ, представленной в данной работе, среди отечественных разработок РБМК-1000 (Б_{к1}) и ВВЭР-1000 (Б_{к2}). Из анализа видно, что разрабатываемая ЯЭУ имеет довольно большое число преимуществ, но в основном показатели разрабатываемой ЯЭУ похожи на показатели для отечественного РБМК-1000 (Б_{к1}). Не маловажным фактом является то, что разрабатываемая установка единственная в своем роде и представительства на рынке не имеет.

3.3 SWOT-анализ

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

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

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

- при использовании жидкометаллического теплоносителя (ЖМТ) в данной установке типа УГР имеем преимущество избежать кипения теплоносителя в каналах активной зоны, а также отпадает необходимость в некотором дорогостоящем оборудовании;
- возможность регулирования расхода теплоносителя отдельно в каждом канале, позволяющая контролировать теплотехническую надёжность активной зоны;
- в случае использования канальной схемы имеем возможность увеличения мощности установки, при этом избегая увеличения размеров активной зоны реактора;

– возможность перегрузки топлива в реакторе, не останавливая его.

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

Слабыми сторонами разрабатываемой ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности:

– использование свинца в качестве теплоносителя, из-за большой химической активности свинца при взаимодействии с водой в случае аварии;

– использование ЖМТ ведёт к необходимости поддержания его в жидком виде, что подразумевает наличие оборудования для подогрева теплоносителя;

– наличие множества трубопроводов и ответвлений в канальной схеме, что требует для работы участия высококвалифицированного персонала;

– использование канальной схемы делает невозможным создание корпуса реактора, что уменьшает его безопасность.

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

К возможностям данной ЯЭУ можно отнести:

– снижение стоимости электроэнергии;

– предоставление дополнительных рабочих мест;

– расширение производства и мощностей для обеспечения работоспособности ЯЭУ.

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

К угрозам по отношению к ЯЭУ можно отнести:

– природные катаклизмы;

– снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок;

– диверсионные и террористические действия.

В таблице 11 представлен SWOT-анализ в виде таблицы.

Таблица 11 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. При использовании ЖМТ в разрабатываемой установке имеем преимущество избежать кипения теплоносителя в каналах активной зоны. С2. Возможность регулирования расхода теплоносителя отдельно в каждом канале, позволяющая контролировать теплотехническую надёжность активной зоны С3. В случае использования канальной схемы имеем возможность увеличения мощности установки, при этом избегая увеличения размеров активной зоны реактора. С4. возможность перегрузки топлива в реакторе, без его остановки.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1.Использование эвтектического сплава в качестве теплоносителя, из-за большой химической активности натрия в случае взаимодействия с водой. Сл2. Использование ЖМТ ведёт к необходимости поддержания его в жидком виде, что подразумевает наличие оборудования для подогрева теплоносителя. Сл3. Наличие множества трубопроводов и ответвлений в канальной схеме, что требует для работы участия высококвалифицированного персонала. Сл4.Использование канальной схемы делает невозможным создание корпуса реактора, что уменьшает его безопасность.
Возможности: В1.Снижение стоимости электроэнергии. В2.Предоставление рабочих мест. В3.Расширение производства и мощностей для обеспечения работоспособности ЯЭУ	1. Увеличение мощности ЯЭУ приведет к еще более сильному снижению цен на электричество и потребует ввода дополнительных мощностей. 2. Увеличение мощности приведет к увеличению персонала ЯЭУ.	1.Высококвалифицированный персонал повысит качество работы ЯЭУ, безопасность. 2.Дополнительные производства для обеспечения ЯЭУ жидкометаллическим теплоносителем.

Продолжение таблицы 11

Угрозы: У1. Природные катаклизмы. У2. Снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок. У3. Наличие угрозы несанкционированных действий в отношении ЯЭУ.	1. Возможность увеличения мощности влечет за собой привлечение действий террористического и диверсионного характеров. 2. Постоянная работа реактора и возможность увеличения мощности вызывает дополнительный интерес у государства.	1. Отсутствие корпуса у реактора делает его уязвимым перед природными катаклизмами. 2. Использование в качестве теплоносителя жидкого натрия, из-за высокой химической активности при взаимодействии с водой снижает интерес государства к данной ЯЭУ.
---	---	---

Проанализировав характер НТР можно сделать вывод, о том что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями страны-партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Данная стратегия выбрана ввиду того, что предприятие, заинтересованное в ЯЭУ на российском рынке, одно (Росэнергоатом). В свою очередь, данное предприятие требует тесного взаимодействия с другими производственными компаниями.

3.4 Планирование научно-исследовательских работ

3.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Представленная дипломная работа носит научно-исследовательский характер. Экономическая часть настоящей работы включает в себя рассмотрение комплекса предполагаемых работ, планирование которых осуществляется в следующем порядке:

- планирование работы;
- определение структуры работы в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;

– построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований была сформирована рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель и дипломник.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 12.

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

Основные этапы	№ Раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Изучение проблемы и материалов по теме	Бакалавр
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, бакалавр
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Бакалавр
	6	Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога	Руководитель, бакалавр
Обобщение и оценка результатов	7	Определение целесообразности проведения опытно-конструкторских работ (ОКР)	Руководитель
Проведение ОКР			
Разработка технической документации и проектирование	8	Разработка принципиальной схемы	Бакалавр
	9	Выбор и расчет конструкции	Бакалавр
	10	Разработка чертежей основных узлов конструкции	Бакалавр
	11	Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	Бакалавр
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	12	Составление пояснительной записки	Бакалавр
	13	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, бакалавр

3.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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

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

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

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (3.2)$$

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

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

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

2.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (3.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;
 $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (3.4)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;
 $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;
 $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{366}{366 - 105 - 14} = 1,48,$$

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

$$t_{\text{max}1} = 2,$$

$$t_{\text{ожс}1} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4,$$

$$T_{pi} = \frac{1,4}{1} = 1,4,$$

$$T_{ki} = 1,4 \cdot 1,48 = 2.$$

Все значения полученные выше, были сведены в таблицу и представлены в приложение Д.

На основе таблицы 12 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в таблице Д.2, находящейся в приложении, с разбивкой по месяцам и неделям за период времени дипломирования.

3.4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

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

3.4.5 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расхi}, \quad (3.5)$$

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

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

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

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

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 13.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – студент.

Основные работы для ВКР проводились за персональным компьютером (ноутбуком) в комнате жилого дома. Время, проведенное работой у компьютера, примем равным 900 часам. Мощность ноутбука: 0,9 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле

$$C = \Pi_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 2,7 \cdot 0,9 \cdot 900,0 = 2187, \quad (3.6)$$

где $\Pi_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (2,7 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

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

Затраты на электроэнергию составили 2187 рублей.

Таблица 13 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Бумага	шт.	250	0,4	100
2. Печать на листе А4	шт.	200	1,5	300
3. Карандаш	шт.	1	8	8
4. Ластик	шт.	1	12	12
5. Доступ в интернет	месяц	4	450	1800
6. Учебная литература	шт.	1	340	340
7 Электроэнергия	кВт·ч	810	2,70	2187
Итого				4747

3.4.6 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблицу 14.

Таблица 14 — Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Трудоемкость, чел.-дн.		Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.		Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.	
		Б	Р	Б	Р	Б	Р
1	Составление и утверждение технического задания	-	2	0,162	1,116	-	2,232
2	Подбор и изучение материалов по теме	7	-			1,134	-
3	Выбор направления исследований	1	1			0,162	1,116

Продолжение таблицы 14

4	Календарное планирование работ по теме	-	4			-	4,464
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	31	-			5,022	-
6	Разработка чертежей	4	-			0,648	-
7	Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога	2	2			0,324	2,232
8	Определение целесообразности проведения ОКР	-	2			-	2,232
9	Разработка принципиальной схемы	24	-			3,888	-
10	Разработка чертежей основных узлов конструкции	2	-			0,324	-
11	Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	3	-			0,486	-
12	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	9	-			1,458	-
13	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	1			0,162	1,116
Итого:						13,392	15,39

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{\text{зп}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}, \quad (3.7)$$

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

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

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

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (3.8)$$

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (3.9)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

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

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 15).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	119	119
– праздничные дни		
Потери рабочего времени		
– отпуск	30	35
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	217	212

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (3.10)$$

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

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

где $k_{\text{внеб}} = 0,271$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

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

материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} + З_{\text{внеб}} + З_{\text{мат}}) \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы, равный 0,16.

Расчёты основной заработной, дополнительной заработной плат, а также величина отчислений во внебюджетные фонды приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Расчёт основной заработной, дополнительной заработной плат, а так же величина отчислений во внебюджетные фонды.

Исполнители	$З_{\text{тс}}$, тыс. руб.	$k_{\text{р}}$	$З_{\text{м}}$, тыс. руб.	$З_{\text{дн}}$, тыс. руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$З_{\text{осн}}$, Тыс. руб.	$З_{\text{доп}}$, руб.	$З_{\text{внеб}}$, руб.
Руководитель	23,3	1,3	23,3	1,116	12	13,392	2,009	4,174
Бакалавр	3,3	0	3,3	0,162	95	15,39	2,309	4,796
Итого						28,728	4,318	8,97

3.4.7 Формирование бюджета затрат НИП

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 17.

Таблица 17 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.
1. Материальные затраты НТИ	4,7470
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	28,728
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	4,318
4. Отчисления во внебюджетные фонды	8,97
5. Накладные расходы	14,964
Бюджет затрат НТИ	61,727

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

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (3.11)$$

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

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

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

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

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{61727}{61727} = 1.$$

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (3.12)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 18).

Таблица 18 — Оценка характеристик исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Оценка
1. Безопасность	0,25	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4
3. Помехоустойчивость	0,15	3
4. Энергосбережение	0,20	4
5. Надежность	0,20	5
6. Материалоемкость	0,05	3
ИТОГО	1	24

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,05 = 4,25.$$

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} \text{ и т.д.} \quad (3.13)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность

проекта (см.табл.19) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{cp}$):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}. \quad (3.14)$$

Таблица 19 – Эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Оценка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,25
3	Интегральный показатель эффективности	4,25

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Но т.к. задача имеет довольно строгие условия, решение имеет лишь один вариант.

4 Социальная ответственность

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

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [7].

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

Опасным производственным фактором, согласно [7], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

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

4.1 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 20.

Таблица 20 — Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ, Кафедра ФЭУ 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 организация работы»
	—	Пожарная безопасность	Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ.

На бакалавра, 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).

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

4.2.1 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.

4.2.2 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 4.

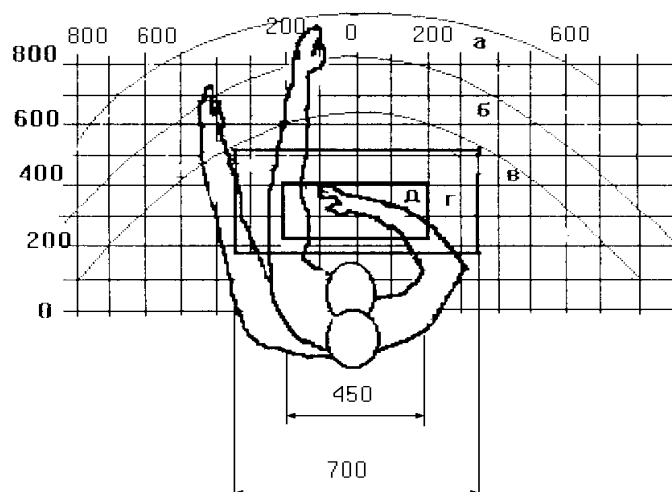


Рисунок 17 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук;

б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в – зона легкой досягаемости ладони;

г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

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

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

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

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

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

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

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

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

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

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

рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

4.2.3 Условия безопасной работы

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

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [8] и приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

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

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

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой

центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность — 40%, скорость движения воздуха — 0,1 м/с, температура летом — 20 – 25 °С, зимой — 13 – 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

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

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [8] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

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

Плотность магнитного потока должна быть не более:

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может

происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [8] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

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

4.3 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 к полу, стенам, оказавшимся под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклчение в корпус токоведущих частей) [9].

4.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [10], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

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

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

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение

производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

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

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

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);

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

Заключение

По результатам выполненной работы можно следующие выводы:

- выполнен оценочный расчёт реактора типа УГР со свинцовым теплоносителем, определены параметры конструктивной схемы ячейки оценены размеры активной зоны, найден эффективный коэффициент размножения для «холодного» и «горячего» состояния реактора 1,235 и 1,16 соответственно;
- выбранный состав активной зоны обеспечивает отрицательное значение температурного коэффициента реактивности ($\alpha = -0,0017 K^{-1}$), что говорит о саморегулируемости и устойчивости реактора при работе;
- выполнен многогрупповой расчет ядерного реактора, найдено значение эффективного коэффициента размножения 1,14, построены графики распределения плотности потоков нейтронов и ценностей;
- рассчитано изменение нуклидного состав ядерного топлива путем отравления и шлакования, с помощью разработанного программного продукта и с помощью известных соотношений. Значения параметров отравления, полученные путем программного моделирования процесса отравления, по порядку величины соответствуют значениям, полученным расчетным путем по известным соотношениям, что свидетельствует о работоспособности разработанных моделей расчета нуклидного состава ядерного топлива.

Список публикаций

Список используемых источников

1. Физические величины: Справочник /Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
2. Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алтухов. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
3. Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет, 2002. – 192 с.
4. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 137 с.
5. 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.
6. Колпаков Г.Н., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах. Часть I: Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 1997. – 80 с.
7. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17.07.99 №181 – ФЗ. // Российская газ. – 1999. – 11.02. – С. 5
8. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»: СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.: – Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 03.06.03 N 118.
9. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [Текст]. – Введ. 30.06.82. – Утв. постановлением Госстандарта СССР от 30.06.82 N 2987.

10. 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.

Приложение А

Таблица А.1– Данные «горячего» реактора.

Материал, нуклид	σ_f , бн	σ_a , бн	σ_s , бн	σ_{tr} , бн	S , см ²	β	Σ_f , см ⁻¹	Σ_a , см ⁻¹	Σ_s , см ⁻¹	Σ_{tr} , см ⁻¹	$\xi\Sigma_s$, см ⁻¹
Замедлитель (C ¹²)	—	0,00196	4,7	4,4408	1407,487	0,695	—	0,000207	0,401	0,379	0,063
Теплоноситель (Pb ²⁰⁷)	—	0,08329	11,30	11,3469	227,616	0,112	—	0,0034112	0,373	0,375	0,004
Топливо (UN)	—	—	—	—	380,563	0,188	0,227	0,374	0,647	0,051	0,647
N ¹⁴	—	0,90640	9,8	10,2397	—	—	—	0,038	0,335	0,046	0,335
U ²³⁵	285,1	334,6322	15,0	349,5897	—	—	0,227	0,267	0,010	0,002	0,010
U ²³⁸	—	1,32775	9,0	10,3025	—	—	—	0,069	0,302	0,003	0,302
Оболочка КМ	—	—	—	—	6,100	0,004	—	0,1578	0,8891	0,0314	0,8891
Fe ⁵⁶	—	1,23956	11,4	12,5038	—	—	—	0,093	0,689	0,024	0,689
Cr ⁵²	—	1,51883	4,2	5,6650	—	—	—	0,031	0,070	0,003	0,070
Ni ⁵⁹	—	2,25375	17,0	19,0617	—	—	—	0,020	0,124	0,004	0,124
Ti ⁴⁹	—	2,84168	4,2	6,9845	—	—	—	0,003	0,003	0,00013	0,003
Mn ⁵⁵	—	6,44767	2,3	8,7198	—	—	—	0,010	0,003	0,00011	0,003

Приложение Б

Таблица Б.1– Многогрупповые константы

№ гр	$\Sigma_a(\text{смеси})$	$\Sigma_z(\text{смеси})$	$\Sigma_{tr}(\text{смеси})$	$D_{\text{см}}$	$\Sigma_f(\text{смеси})$	ε_I	I	I^+
1	0,00827	0,45045	0,08106	4,11179	0,00652	0,016	0,0349	1,1606
2	0,00529	0,44517	0,10261	3,24835	0,00380	0,088	0,2048	1,1421
3	0,00524	0,42166	0,14536	2,29303	0,00381	0,184	0,5351	1,1333
4	0,00421	0,32203	0,13779	2,41908	0,00325	0,270	1,3407	1,1330
5	0,00133	0,25625	0,17515	1,90312	0,00028	0,202	2,1981	1,1191
6	0,00131	0,21202	0,21396	1,55787	0,00015	0,141	3,4558	1,1204
7	0,00119	0,27533	0,28906	1,15312	0,00018	0,061	3,2233	1,1244
8	0,00169	0,34627	0,32893	1,01338	0,00021	0,024	2,7254	1,1272
9	0,00258	0,36467	0,36004	0,92580	0,00027	0,01	2,6403	1,1308
10	0,00334	0,38381	0,37798	0,88186	0,00034	0,003	2,4967	1,1366
11	0,00425	0,38231	0,39377	0,84649	0,00043	0,001	2,4894	1,1441
12	0,00509	0,41506	0,40833	0,81632	0,00056	0	2,2657	1,1537
13	0,00608	0,41660	0,41109	0,81084	0,00069	0	2,2253	1,1643
14	0,00719	0,41088	0,40688	0,81922	0,00093	0	2,2179	1,1771
15	0,00888	0,41739	0,40419	0,82468	0,00141	0	2,1382	1,1919
16	0,00908	0,36531	0,36919	0,90286	0,00205	0	2,3845	1,2088
17	0,01225	0,44212	0,41730	0,79878	0,00277	0	1,9175	1,2248
18	0,01246	0,42824	0,40482	0,82339	0,00432	0	1,9240	1,2434
19	0,01993	0,44975	0,41907	0,79540	0,00532	0	1,7546	1,2549
20	0,02726	0,43361	0,42109	0,79158	0,00515	0	1,7126	1,2816
21	0,05389	0,42662	0,44293	0,75256	0,00414	0	1,5457	1,3332
22	0,00772	0,42297	0,39118	0,85210	0,00223	0	1,5314	1,4778
23	0,01090	0,42298	0,39447	0,84500	0,00450	0	0,2810	1,4917
24	0,01582	0,42299	0,39948	0,83440	0,00823	0	0,2709	1,5040
25	0,03397	0,42300	0,41770	0,79800	0,01993	0	0,2508	1,5129
26	0,05861	–	0,44189	0,75433	0,03676	0	10,6977	1,5200

Приложения В

Таблица В.1 – Таблица переходов ($\Sigma_3^{i \rightarrow k}$, см⁻¹)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1		0,1201	0,0408	0,0963	0,0831	0,0657	0,0296	0,0110	0,0032	0,0007																
2			0,2094	0,0606	0,0750	0,0607	0,0277	0,0085	0,0029	0,0003																
3				0,2827	0,0540	0,0472	0,0243	0,0104	0,0025	0,0007																
4					0,2361	0,0532	0,0215	0,0085	0,0024	0,0004																
5						0,2203	0,0247	0,0088	0,0022	0,0003																
6							0,2104	0,0002	0,0011	0,0004																
7								0,2746	0,0007																	
8									0,3462	0,0001																
9										0,3637	0,0010															
10											0,3838															
11												0,3823														
12													0,4151													
13														0,4166												
14															0,4109											
15																0,4174										
16																	0,3653									
17																		0,4421								
18																			0,4282							
19																				0,4498						
20																					0,4336					
21																						0,4266				
22																							0,4230			
23																								0,4230		
24																									0,4230	
25																										0,4230
26																										

Приложение Г

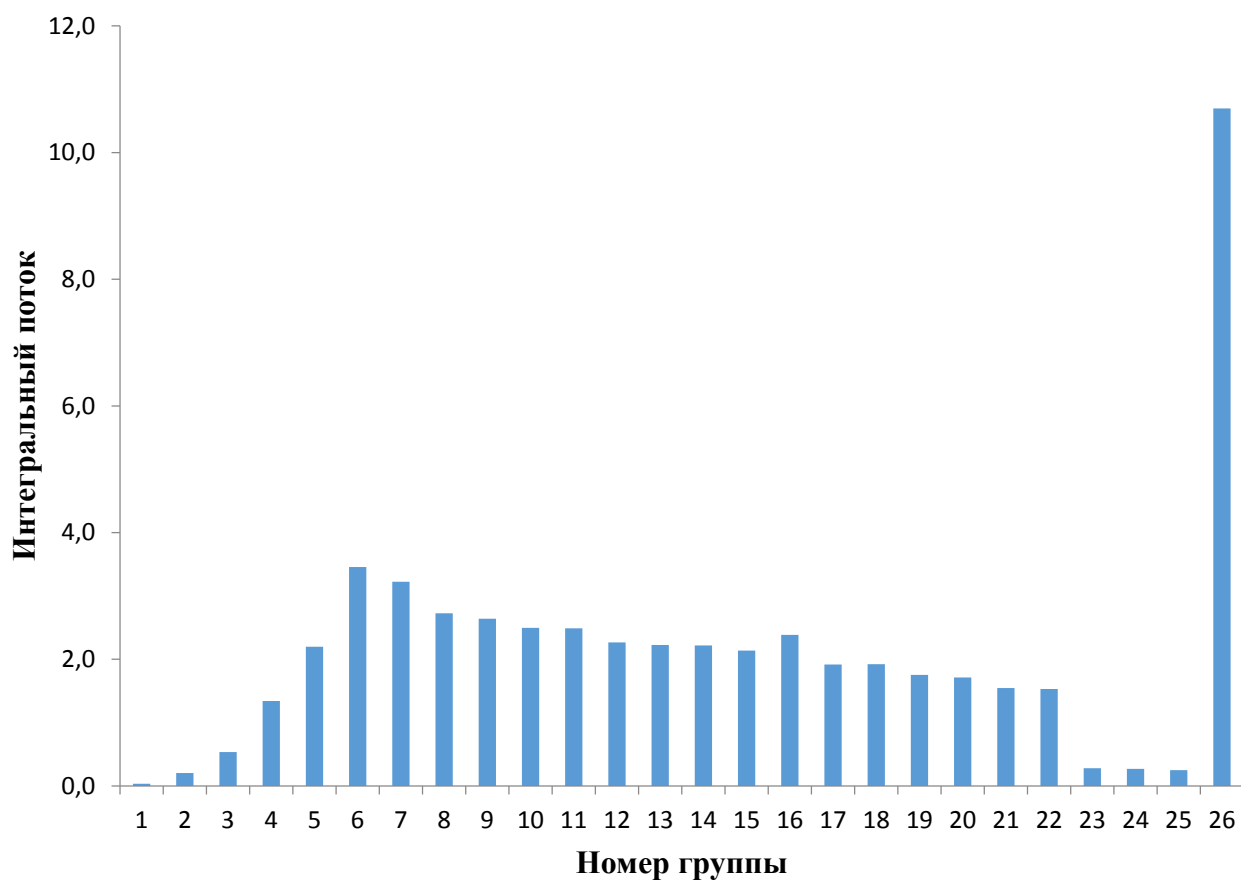


Рисунок Г.1 – График интегрального потока нейтронов

Приложение Д

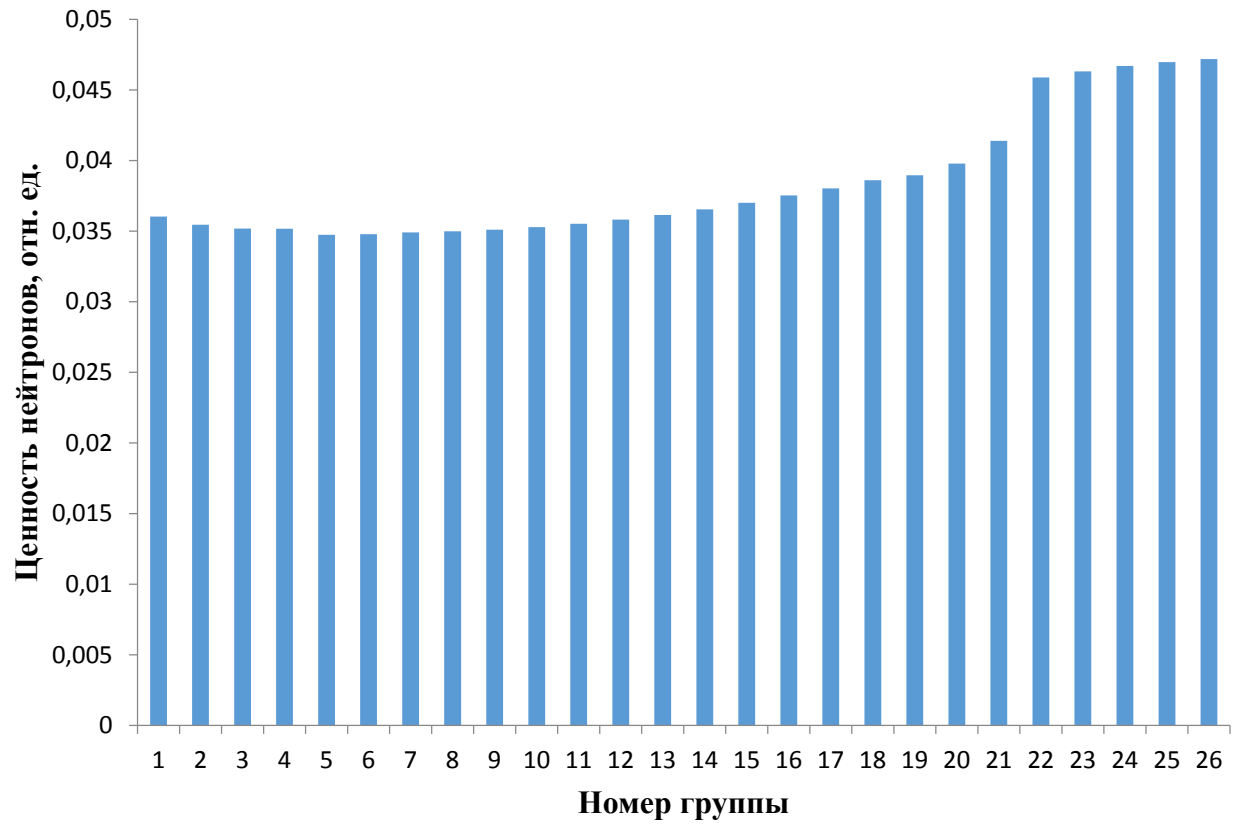


Рисунок Д.1 – График ценности нейтронов

Приложение Е

Таблица Е.1 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ						Длительность в раб. днях, T_{pi}		Длительность работ в календарных днях, T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож\ i}$, чел-дни					
	Д	Р	Д	Р	Д	Р	Д	Р	Д	Р
1. Составление и утверждение технического задания	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2
2. Подбор и изучение материалов по теме	4	-	6	-	4,8	-	4,8	-	7	-
3.Выбор направления исследований	1	1	2	2	1,4	1,4	0,7	0,7	1	1
4.Календарное планирование работ по теме	-	1	-	5	-	2,6	-	2,6	-	4
5.Проведение теоретических расчетов и обоснований	15	-	30	-	21	-	21	-	31	-
6.Сопоставлени е результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	4	-
7.Оценка достоверности полученных характеристик, путем сравнения их с характеристика ми существующего аналога	2	2	3	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
8.Определение целесообразност и проведения ОКР	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2

Продолжение таблицы Е.1

9.Разработка принципиальной схемы	10	-	25	-	16	-	16	-	24	-
10.Разработка чертежей	2	-	3	-	2,4	-	1,2	-	2	-
11.Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	3	-
12.Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	5	-	7	-	5,8	-	5,8	-	9	-
13.Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	1	2	2	1,4	1,4	0,7	0,7	1	1

Продолжение приложения Е

Таблица Е.2 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				март.				апрель				май				июнь			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Составление и утверждение технического задания	Р	2																
2	Подбор и изучение материалов по теме	Б	7																
3	Выбор направления исследований	Б, Р	1, 1																
4	Календарное планирование работ по теме	Р	4																
5	Проведение теор. расчетов и обоснований	Б	31																
6	Разработка чертежей	Б	4																
7	Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога	Б, Р	2, 2																
8	Определение целесообразности проведения ОКР	Р	2																
9	Разработка принципиальной схемы	Б	24																
10	Разработка чертежей основных узлов конструкции	Б	2																
11	Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	Б	3																

Продолжение таблицы Е.2.

[illegible]

 - студент;  - руководитель.

Приложение Ж ФЮРА.562527.009 СБ

Приложение 3 ФЮРА.562527.009

Приложение И ФЮРА.562527.009 СП