

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 ВВЭР мощностью 3300 МВт

УДК 621.039.536

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Малахов Александр Олегович		

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 Ядерная 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	Малахову Александру Олеговичу

Тема работы:

Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа ВВЭР мощностью 3300 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 3300 [МВт] - Ядерное горючее UO_2 - Обогащение урана 4,4 % - Температура на входе 297,2 [°C] - Температура на выходе 328,8 [°C] - Материалы оболочек ТВЭЛов и кассет сплав Э110
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
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	Малахов Александр Олегович		16.05.2016

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A2B	Малахову Александру Олеговичу

Институт	ФТИ	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	1.Стоимость расходных материалов 2.Стоимость расхода электроэнергии 3.Норматив заработной платы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	1.Тариф на электроэнергию 2.Коэффициенты для расчета заработной платы
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	1.Отчисления во внебюджетные фонды (27,1%) 2.Расчет дополнительной заработной платы (12%)

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	1.Потенциальные потребители результатов исследования; 2.Анализ конкурентных технических решений; 3.SWOT – анализ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	1.Структура работ в рамках научного исследования; 2.Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; 3.Бюджет научно - технического исследования (нти).
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	1.Определение интегрального финансового показателя разработки; 2.Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3.Определение интегрального показателя

	эффективности
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 Ася Александровна	Доцент, кандидат химических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Малахов Александр Олегович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0A2B	Малахов Александр Олегович

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	Малахов Александр Олегович		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 88 с., 7 рис., 17 табл., 7 источников, 5 прил., 2 чертежа.

Ключевые слова: ядерный реактор; нейтронно-физический расчет; многогрупповой расчет; отравление; шлакование; выгорание; финансовый менеджмент; социальная ответственность.

Объектом исследования является водо-водяной реактор с водным теплоносителем.

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

В процессе исследования проводились расчеты нейтронно-физических характеристик реактора, на основании которых были получены таблицы и построены графики; произведен расчет финансовой составляющей работы, описаны факторы, влияющие на выполнение работы.

В результате исследования были получены нейтронно-физические характеристики реактора заданного материального состава, оценены размеры активной зоны, также произведен расчет параметров нестационарных и переходных нейтронно-ядерно-физических процессов.

Основные конструктивные, технологические и эксплуатационные характеристики: ядерный реактор, мощностью 3300 МВт, с топливом UO_2 и обогащением 4,4 %, с водным теплоносителем, использующий в качестве конструкционных материалов сплав циркония и ниобия марки Э110.

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

Область применения: ядерные реакторы.

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.....	16
1 Нейтронно-физические параметры критического реактора.....	18
1.1 Предварительный расчёт.....	18
1.2 Расчёт концентраций	21
1.3 Расчет микросечений и макросечений для «холодного» реактора.....	22
1.3.1 Расчёт микросечений и макросечений для U^{235}	23
1.3.2 Расчёт микросечений и макросечений для U^{238}	24
1.3.3 Расчёт микросечений и макросечений для кислорода в топливе	25
1.3.4 Расчёт макросечений для UO_2	25
1.3.5 Расчёт микросечений и макросечений для циркония	26
1.3.6 Расчёт микросечений и макросечений для ниобия.....	26
1.3.7 Расчёт микросечений и макросечений для сплава	27
1.3.8 Расчёт макросечений для теплоносителя и замедлителя.....	27
1.4 Расчёт долей материалов в ячейке	27
2 Расчёт «бесконечного» коэффициента размножения k_{∞}	29
2.1 Расчет коэффициента выхода нейтронов на один акт деления η	29
2.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах μ	29
2.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов θ	31
2.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата ϕ	32
3 Расчёт эффективного коэффициента размножения $k_{эф}$	34
4 Расчёт «горячего» реактора.....	36
5 Многогрупповой расчёт	41

6 Расчёт нуклидного состава топлива.....	45
6.1 Цепочки ядерных превращений в облученном ядерном топливе.....	45
6.2 Построение цепочек ядерных превращений	46
6.3 Подготовка ядерно-физических данных.....	48
6.4 Модель накопления изотопов в облученном ядерном топливе	48
6.5 Отравление реактора.....	54
6.5.1 Расчёт отравления реактора при помощи программного модуля.....	54
6.5.2 Расчёт отравления реактора по известным формулам	55
6.5.3 Потери реактивности при отравлении ксеноном.....	55
6.5.4 Расчет «Йодной ямы» при полном останове реактора, работающего на номинальной мощности.....	56
6.5.5 Оценка результатов.....	57
7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	58
7.1 Потенциальные потребители результатов исследования	58
7.2 Анализ конкурентных технических решений	59
7.3 SWOT-анализ.....	61
7.4 Планирование научно-исследовательских работ.....	64
7.5 Определение трудоемкости выполнения работ	66
7.6 Разработка графика проведения научного исследования	67
7.7 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	68
7.7.1 Расчет материальных затрат НТИ	69
7.7.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	70
7.7.3 Дополнительная заработная плата	72
7.7.4 Отчисления во внебюджетные фонды	73
7.7.5 Расчет затрат на научные и производственные командировки.....	74

7.7.6 Контрагентные расходы	74
7.7.7 Накладные расходы.....	75
7.7.8 Формирование бюджета затрат НИП.....	75
8 Социальная ответственность	76
8.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	77
8.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	78
8.3 Технические мероприятия.....	79
8.4 Условия безопасной работы.....	81
8.5 Электробезопасность	84
8.6 Пожарная и взрывная безопасность	85
Заключение	87
Список использованных источников	88
Приложение А	89
Приложение Б	90
Приложение В.....	91
Приложение Г	94
Приложение Д.....	96

Введение

Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) играют важную роль среди немалого выбора типов реакторов. На данный момент атомные энергетические станции (АЭС) с такими типами реакторов, использующие ядерное топливо, смотрятся намного выгодней, чем станции на любом другом топливе.

ВВЭР имеет ряд важных достоинств:

- доступность и отработанная технология воды;
- большие удельная и объёмная мощности при относительно небольших габаритах и умеренных критических нагрузках реактора;
- возможность применения одноконтурной схемы с подачей пара теплоносителя первого контура в силовую установку;
- высокая замедляющая способность воды в сочетании со слабым рассеянием нейтронов водородом при больших энергиях позволяет обеспечивать глубокое выгорание при умеренных обогащениях топлива;
- высокая степень внутренней устойчивости благодаря отрицательному плотностному коэффициенту реактивности.

Вместе с тем ВВЭР обладают недостатками, так как в качестве теплоносителя и замедлителя используется вода:

- большое сечение поглощения нейтронов, что делает невозможным использование в качестве топлива урана с природной концентрацией делящегося нуклида;
- высокое давление при энергетически приемлимых температурах;
- коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом, что заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы.

Модификация реактора ВВЭР связан с проектом «ВВЭР-ТОИ». Где «ТОИ» – это аббревиатура, означающая три основных принципа, которые заложены в проектирование атомной станции: типизация принимаемых

решений, оптимизация технико-экономических показателей проекта «АЭС-2006» и информационная составляющая.

В проекте «ВВЭР-ТОИ» постепенно и поэтапно модернизируются отдельные элементы как непосредственно реакторной установки, так и стационарного оборудования, повышаются технологические и эксплуатационные параметры, развивается промышленная база, совершенствуются методы строительства и финансового сопровождения. В полном объеме применены современные новации, относящиеся к направлению водо-водяного корпусного реактора.

Основные направления оптимизации проектных и технических решений в сравнении с проектом «АЭС-2006»:

- оптимизация сочетания целевых показателей экономичности выработки электроэнергии и использования топлива;
- повышение тепловой мощности реактора с увеличением электрической мощности (брутто) до 1300 МВт;
- усовершенствование конструкции активной зоны, направленное на увеличение запасов по теплотехнической надёжности её охлаждения;
- дальнейшее развитие пассивных систем безопасности.

Цель работы заключается в оценочном нейтронно-физическом расчёте реактора, а именно: расчёт «холодного» реактора, расчёт «горячего» реактора, многогрупповой расчёт.

Для её решения были поставлены следующие задачи:

- обзор литературы,
- изучение теоретической части (эксплуатационных параметров и конструктивных особенностей реакторов),
- нейтронно-физический расчёт,
- обработка полученных результатов.

1 Нейтронно-физические параметры критического реактора

1.1 Предварительный расчёт

Для расчёта нейтронно-физических параметров реактора на тепловых нейтронах необходимо оценить размеры активной зоны данного реактора. Все необходимые данные для расчёта указаны в таблице 1.

Таблица 1 – рабочие параметры реактора

Заданная тепловая мощность, МВт	N	3000
Среднеинтегральное знач. мощности, кВт/л	$\bar{N}_0$	85
Отношение высоты к диаметру	m	0,9
Коэффициент увеличения АЗ	η	1,2
Объемный коэффициент неравномерности	K_v	2
Осевой коэффициент неравномерности	K_z	1,2
Размер ячейки под ключ, см	$a_{\text{яч}}$	23,8
Число ТВЭЛОВ в ТВС	n	312
Диаметр топливной таблетки, см	$D_{\text{табл}}$	0,757
Внешний диаметр ТВЭЛА, см	$D_{\text{внеш.}}$	0,91
Внутренний диаметр ТВЭЛА, см	$D_{\text{внутр.}}$	0,845

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

$$V_{\text{акт.з.}} = \frac{N}{\bar{N}_0} \eta \text{ [см}^3\text{]}; \quad (1.1)$$

$$D_{\text{акт.з.}} = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{акт.з.}}}{\pi m}} \text{ [см]}; \quad (1.2)$$

$$H_{\text{акт.з.}} = m D_{\text{акт.з.}} \text{ [см]}; \quad (1.3)$$

где $V_{\text{акт.з.}}$, $D_{\text{акт.з.}}$, $H_{\text{акт.з.}}$ – объем, диаметр, высота активной зоны;

m – отношение высоты к диаметру, обычно $m = 0,8 - 1,0$;

N – заданная мощность реактора, МВт;

η – коэффициент учитывающий увеличение объема реактора вследствие размещения регулирующих стержней.

Коэффициент отличается от единицы, если регулирующие стержни занимают отдельные ячейки реактора ($\eta = 1,1-1,3$).

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = \bar{N}_0 K_V \text{ [кВт/л]}; \quad (1.4)$$

где K_V – объемный коэффициент неравномерности тепловыделения.

Обычно для теплового реактора с однородной активной зоной $K_V = 2 - 3$.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{0,116 \cdot n \cdot P_0} \left[\frac{\text{Гкал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} \right]; \quad (1.5)$$

где P_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛ, см;

n – число ТВЭЛов в кассете;

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

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

$$v = \frac{q_{\max} \cdot P_0 \cdot H_{\text{акт.з.}}}{3,6 \cdot \Delta i \cdot \rho \cdot K_z \cdot S} \text{ [м/с]}; \quad (1.6)$$

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

K_z – осевой коэффициент неравномерности ($K_z = 1,2 - 1,5$);

S – 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:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) \text{ [ккал/кг]}. \quad (1.7)$$

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

В настоящее время для воды, органических жидкостей и легких металлов можно принимать скорость 10 м/с.

Объем активной зоны:

$$V_{\text{А.З.}} = \frac{N}{\bar{N}_0} \cdot \eta = \frac{3300 \cdot 10^6}{85} \cdot 1,2 = 4,66 \cdot 10^7 \text{ [см]}.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{\text{А.З.}} = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{А.З.}}}{\pi m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 4,66 \cdot 10^7}{3,14 \cdot 0,9}} = 403,94 \text{ [см]}.$$

Высота активной зоны:

$$H_{\text{А.З.}} = m \cdot D_{\text{А.З.}} = 0,9 \cdot 403,94 = 363,54 \text{ [см]}.$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{\text{max}} = \bar{N}_0 \cdot K_V = 85 \cdot 2 = 170 \text{ [кВт/см}^3\text{]}.$$

Площадь сечения ячейки:

$$S_{\text{яч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot a_{\text{яч}}^2}{2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 23,8^2}{2} = 490,55 \text{ [см}^2\text{]}.$$

Периметр тепловыделяющей поверхности твэл:

$$\Pi_0 = \pi d_{\text{ТВЭЛ}} = 3,14 \cdot 0,91 = 2,859 \text{ [см]}.$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\text{max}} = \frac{N_{\text{max}} \cdot S_{\text{яч}}}{0,116 \cdot \Pi_0 \cdot \eta} = \frac{170 \cdot 490,55}{0,116 \cdot 2,859 \cdot 1,2} = 0,806 \text{ [Гкал/(м}^2 \cdot \text{ч)]}.$$

Площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один элемент:

$$S = \frac{S_{\text{яч}} - \left(\frac{\pi \cdot \eta \cdot d_{\text{ТВЭЛ}}^2}{4} \right)}{\eta} = \frac{490,55 - \left(312 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,91^2}{4} \right)}{312} = 0,922 \text{ [см}^2\text{]}.$$

Разность теплосодержания теплоносителя на выходе:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,39 \cdot (328,8 - 297,8) = 43,924 \text{ [ккал/кг]}.$$

Плотность теплоносителя:

$$\gamma = 0,6989 \text{ [г/см}^3\text{]}.$$

Необходимая скорость прокачки теплоносителя:

$$v = \frac{q_{\text{max}} \cdot \Pi_0 \cdot H_{\text{А.З.}}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S} = \frac{0,806 \cdot 2,859 \cdot 363,54}{3,6 \cdot 1,2 \cdot 0,6989 \cdot 43,924 \cdot 0,922} = 6,85 \text{ [м/с]}.$$

Таким образом, получившаяся скорость прокачки теплоносителя (воды) удовлетворяет установленным требованиям ($v < 10$ м/с).

1.2 Расчёт концентраций

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

$$N_i = \frac{\rho N_A}{A} \text{ [ядер/см}^3\text{]}; \quad (1.8)$$

где ρ – плотность вещества, г/см³;

A – атомный вес элемента;

N_A – число Авогадро.

Топливом является диоксид урана (UO_2), обогащенный по U^{235} на 4,4 %. Поэтому ядерная концентрация топлива рассчитывается следующим образом:

$$N_{UO_2} = \frac{\rho_{UO_2} \cdot N_A}{A_{UO_2}} = \frac{10,4 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{270} = 2,32 \cdot 10^{22} \text{ [молекул/см}^3\text{]}.$$

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

$$N_U^{235} = \omega \cdot N_{UO_2} = 0,044 \cdot 2,32 \cdot 10^{22} = 1,021 \cdot 10^{21} \text{ [ядер/см}^3\text{]};$$

$$N_U^{238} = (1 - \omega) \cdot N_{UO_2} = 0,956 \cdot 2,32 \cdot 10^{22} = 2,218 \cdot 10^{22} \text{ [ядер/см}^3\text{]};$$

$$N_O = 2 \cdot N_{UO_2} = 2 \cdot 2,32 \cdot 10^{22} = 4,64 \cdot 10^{22} \text{ [ядер/см}^3\text{]}.$$

Состав оболочки твэла следующий: 99 % – цирконий; 1 % – ниобий. Соответственно произведем расчет концентрации каждой компоненты, входящей в состав сплава.

$$N_{Zr} = C_{Zr} \frac{\rho_{\text{спл}} \cdot N_A}{A_{\text{спл}}} = 0,99 \cdot \frac{6,552 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{90,91} = 4,3 \cdot 10^{22} \text{ [ядер/см}^3\text{]};$$

$$N_{Nb} = C_{Nb} \frac{\rho_{\text{спл}} \cdot N_A}{A_{\text{спл}}} = 0,01 \cdot \frac{6,552 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{90,91} = 4,34 \cdot 10^{20} \text{ [ядер/см}^3\text{]}.$$

Теплоносителем в данном ядерном реакторе служит вода:

$$N_{H_2O} = \frac{\rho_{H_2O} N_A}{A_{H_2O}} = \frac{0,6989 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{18} = 2,338 \cdot 10^{22} \text{ [молекул/см}^3\text{]};$$

$$N_O = N_{H_2O} = 2,338 \cdot 10^{22} \text{ [ядер/см}^3\text{]};$$

$$N_H = N_{H_2O} = 2 \cdot 2,338 \cdot 10^{22} = 4,676 \cdot 10^{22} \text{ [ядер/см}^3\text{]}.$$

1.3 Расчет микросечений и макросечений для «холодного» реактора

Так как приведённые в справочниках значения сечений указаны для энергии нейтронов 0,0252 эВ, при которой распределение нейтронов соответствует спектру Максвелла, возникла необходимость обработки сечений

При нейтронно-физических расчетах все поперечные сечения должны быть отнесены к средней скорости нейтронов. Спектр Максвелла для тепловых нейтронов постепенно переходит в спектр замедляющихся нейтронов при температуре 293 К и при энергии примерно равной $E = 0,2$ эВ, которая называется «энергией сшивки».

Так как тепловые нейтроны поглощаются, распределение тепловых нейтронов не идеально совпадает с распределением Максвелла, и их спектр сдвинут в область больших энергий.

С целью сделать расчёты в теории реакторов более удобными приняли, что тепловые нейтроны распределены по спектру Максвелла, но имеют более высокую эффективную температуру (температура нейтронного газа – $T_{\text{НГ}}$), которая превышает температуру замедлителя. Поперечные сечения поглощения и деления, отнесенные к средней скорости тепловых нейтронов, определяются по формуле:

$$\sigma_a = \sigma_{a0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}}; \quad (1.9)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{НГ}}}}; \quad (1.10)$$

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

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

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

Температура активной зоны в холодном реакторе с жидкометаллическим теплоносителем должна на 20–50° превышать температуру плавления теплоносителя. При подсчете ядерной концентрации необходимо учитывать зависимость плотности теплоносителя от температуры.

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

$$\Sigma_i = \sigma_i \cdot N_i; \quad (1.11)$$

причем:

$$\sigma_{tr_i} = \sigma_{a_i} + \sigma_{in_i} + \sigma_{s_i} \cdot (1 - \mu_i). \quad (1.12)$$

Замедляющую способность вещества можно оценить по соотношению:

$$\xi \Sigma_i = \sum_{i=1}^m \xi_i \Sigma_i; \quad (1.13)$$

где ξ_i – логарифмический декремент:

$$\xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}}. \quad (1.14)$$

1.3.1 Расчёт микросечений и макросечений для U^{235}

Произведем расчет сечений для температуры нейтронного газа равной 400 К.

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

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

$\sigma_{a_0}^{U5} = 683$ б – табличное сечение поглощения U^{235} .

$\sigma_{f_0}^{U5} = 582$ б – табличное сечение деления U^{235} .

Тогда, с учетом поправок, сечения для U^{235} пересчитываются по формулам:

$$\sigma_a^{U5} = 0,884 \cdot 0,96 \cdot 683 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 496,076 \text{ [б]};$$

$$\sigma_f^{U5} = 0,884 \cdot 0,96 \cdot 582 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 422,718 \text{ [б]};$$

$$\sigma_s^{U5} = 15 \text{ [б]};$$

$$\mu_s^{U5} = 0;$$

$$\sigma_{tr}^{U5} = 496,076 + 15 \cdot (1 - 0) = 511,076 \text{ [б]};$$

$$\Sigma_a^{U5} = N_{U5} \cdot \sigma_a^{U5} \cdot 10^{-24} = 1,021 \cdot 10^{21} \cdot 496,076 \cdot 10^{-24} = 0,5065 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\Sigma_f^{U5} = N_{U5} \cdot \sigma_f^{U5} \cdot 10^{-24} = 1,021 \cdot 10^{21} \cdot 422,718 \cdot 10^{-24} = 0,4316 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\Sigma_s^{U5} = N_{U5} \cdot \sigma_s^{U5} \cdot 10^{-24} = 1,021 \cdot 10^{21} \cdot 15 \cdot 10^{-24} = 0,0153 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\Sigma_{tr}^{U5} = N_{U5} \cdot \sigma_{tr}^{U5} \cdot 10^{-24} = 1,021 \cdot 10^{21} \cdot 511,076 \cdot 10^{-24} = 0,522 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\xi_{U5} = \frac{2}{A_{U5} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 0,0085;$$

$$\xi \Sigma_s^{U5} = 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0153 = 0,00013 \text{ [см}^{-1}\text{]}.$$

1.3.2 Расчёт микросечений и макросечений для U^{238}

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

$\sigma_{a_0}^{U8} = 2,71$ [б] – табличное сечение поглощения U^{238} .

$$\sigma_a^{U8} = 0,884 \cdot 1 \cdot 2,71 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 2,05 \text{ [б]};$$

$$\sigma_s^{U8} = 9 \text{ [б]};$$

$$\mu_s^{U8} = 0;$$

$$\sigma_{tr}^{U8} = 2,05 + 9 \cdot (1 - 0) = 11,05 \text{ [б]};$$

$$\Sigma_a^{U8} = N_{U8} \cdot \sigma_a^{U8} \cdot 10^{-24} = 2,2186 \cdot 10^{22} \cdot 2,05 \cdot 10^{-24} = 0,0455 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\Sigma_s^{U8} = N_{U8} \cdot \sigma_s^{U8} \cdot 10^{-24} = 2,2186 \cdot 10^{22} \cdot 9 \cdot 10^{-24} = 0,1996 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\Sigma_{tr}^{U8} = N_{U8} \cdot \sigma_{tr}^{U8} \cdot 10^{-24} = 2,2186 \cdot 10^{22} \cdot 11,05 \cdot 10^{-24} = 0,245 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\xi_{U8} = \frac{2}{A_{U8} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 0,00838;$$

$$\xi \Sigma_s^{U8} = 0,00838 \cdot 0,1996 = 0,00167 \text{ [см}^{-1}\text{]}.$$

1.3.3 Расчёт микросечений и макросечений для кислорода в топливе

$$\sigma_a^O = 0 \text{ [б]};$$

$$\sigma_f^O = 0 \text{ [б]};$$

$$\sigma_s^O = 3,75 \text{ [б]};$$

$$\mu_s^O = 0,04;$$

$$\sigma_{tr}^O = 0 + 3,75 \cdot (1 - 0,04) = 3,6 \text{ [б]};$$

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

$$\Sigma_s^O = N_O \cdot \sigma_s^O \cdot 10^{-24} = 4,64 \cdot 10^{22} \cdot 3,75 \cdot 10^{-24} = 0,174 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\Sigma_{tr}^O = N_O \cdot \sigma_{tr}^O \cdot 10^{-24} = 4,64 \cdot 10^{22} \cdot 3,6 \cdot 10^{-24} = 0,167 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\xi_O = \frac{2}{A_O + \frac{2}{3}} = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0,12;$$

$$\xi \Sigma_s^O = 0,12 \cdot 0,174 = 0,0209 \text{ [см}^{-1}\text{]}.$$

1.3.4 Расчёт макросечений для UO₂

$$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U5} + \Sigma_a^{U8} + \Sigma_a^O = 0,5065 + 0,0455 + 0 = 0,552 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\Sigma_f^{UO_2} = \Sigma_f^{U5} + \Sigma_f^{U8} + \Sigma_f^O = 0,4316 + 0 + 0 = 0,4316 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\Sigma_s^{UO_2} = \Sigma_s^{U5} + \Sigma_s^{U8} + \Sigma_s^O = 0,0153 + 0,1996 + 0,174 = 0,3889 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\Sigma_{tr}^{UO_2} = \Sigma_{tr}^{U5} + \Sigma_{tr}^{U8} + \Sigma_{tr}^O = 0,522 + 0,245 + 0,167 = 0,934 \text{ [см}^{-1}\text{]};$$

$$\xi \Sigma_s^{UO_2} = \xi \Sigma_s^{U5} + \xi \Sigma_s^{U8} + \xi \Sigma_s^O = 0,00013 + 0,00167 + 0,0209 = 0,0227 \text{ [см}^{-1}\text{]}.$$

1.3.5 Расчёт микросечений и макросечений для циркония

$f_a = 1$ – поправочный коэффициент для Zr^{91} .

$$\sigma_{a_0}^{Zr} = 0,185 \text{ [б];}$$

$$\sigma_a^{Zr} = 0,884 \cdot 1 \cdot 0,185 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 0,14 \text{ [б];}$$

$$\sigma_s^{Zr} = 6,2 \text{ [б];}$$

$$\mu_s^{Zr} = 0,01;$$

$$\sigma_{tr}^{Zr} = 0,14 + 6,2 \cdot (1 - 0,01) = 6,278 \text{ [б];}$$

$$\Sigma_a^{Zr} = N_{Zr} \cdot \sigma_a^{Zr} \cdot 10^{-24} = 4,3 \cdot 10^{22} \cdot 0,14 \cdot 10^{-24} = 0,006 \text{ [см}^{-1}\text{];}$$

$$\Sigma_s^{Zr} = N_{Zr} \cdot \sigma_s^{Zr} \cdot 10^{-24} = 4,3 \cdot 10^{22} \cdot 6,2 \cdot 10^{-24} = 0,2666 \text{ [см}^{-1}\text{];}$$

$$\Sigma_{tr}^{Zr} = N_{Zr} \cdot \sigma_{tr}^{Zr} \cdot 10^{-24} = 4,3 \cdot 10^{22} \cdot 6,278 \cdot 10^{-24} = 0,2699 \text{ [см}^{-1}\text{];}$$

$$\xi_{Zr} = \frac{2}{A_{Zr} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{91 + \frac{2}{3}} = 0,0218;$$

$$\xi^{Zr} \Sigma_s^{Zr} = 0,0218 \cdot 0,2666 = 0,0058 \text{ [см}^{-1}\text{].}$$

1.3.6 Расчёт микросечений и макросечений для ниобия

$f_a = 1$ – поправочный коэффициент для Nb^{93} .

$$\sigma_{a_0}^{Nb} = 1,16 \text{ [б];}$$

$$\sigma_a^{Nb} = 0,884 \cdot 1 \cdot 1,16 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 0,878 \text{ [б];}$$

$$\sigma_s^{Nb} = 6,5 \text{ [б];}$$

$$\mu_s^{Nb} = 0,01;$$

$$\sigma_{tr}^{Nb} = \sigma_a^{Nb} + \sigma_s^{Nb} \cdot (1 - \mu_s^{Nb}) = 0,878 + 6,5 \cdot (1 - 0,01) = 7,313 \text{ [б];}$$

$$\Sigma_a^{Nb} = N_{Nb} \cdot \sigma_a^{Nb} \cdot 10^{-24} = 4,34 \cdot 10^{20} \cdot 0,878 \cdot 10^{-24} = 0,000381 \text{ [см}^{-1}\text{];}$$

$$\Sigma_s^{Nb} = N_{Nb} \cdot \sigma_s^{Nb} \cdot 10^{-24} = 4,34 \cdot 10^{20} \cdot 6,5 \cdot 10^{-24} = 0,00282 \text{ [см}^{-1}\text{];}$$

$$\Sigma_{tr}^{Nb} = N_{Nb} \cdot \sigma_{tr}^{Nb} \cdot 10^{-24} = 4,34 \cdot 10^{20} \cdot 7,313 \cdot 10^{-24} = 0,003174 \text{ [см}^{-1}\text{];}$$

$$\xi_{Nb} = \frac{2}{A_{Nb} + \frac{2}{3}} = \frac{2}{93 + \frac{2}{3}} = 0,0213;$$

$$\xi^{Nb} \Sigma_s^{Nb} = 0,0213 \cdot 0,00282 = 6 \cdot 10^{-5} [\text{см}^{-1}].$$

1.3.7 Расчёт микросечений и макросечений для сплава

$$\Sigma_s^{\text{спл}} = \Sigma_s^{Zn} + \Sigma_s^{Nb} = 0,2666 + 0,00282 = 0,2694 [\text{см}^{-1}];$$

$$\Sigma_a^{\text{спл}} = \Sigma_a^{Zn} + \Sigma_a^{Nb} = 0,006 + 0,000381 = 0,0064 [\text{см}^{-1}];$$

$$\Sigma_{tr}^{\text{спл}} = \Sigma_{tr}^{Zn} + \Sigma_{tr}^{Nb} = 0,2699 + 0,003174 = 0,273 [\text{см}^{-1}];$$

$$\xi^{\text{спл}} \Sigma_s^{\text{спл}} = \xi^{Zn} \Sigma_s^{Zn} + \xi^{Nb} \Sigma_s^{Nb} = 0,0058 + 6 \cdot 10^{-5} = 0,0059 [\text{см}^{-1}].$$

1.3.8 Расчёт макросечений для теплоносителя и замедлителя

$$\Sigma_a^{H_2O} = 0,0221 [\text{см}^{-1}];$$

$$\Sigma_f^{H_2O} = 0 [\text{см}^{-1}];$$

$$\Sigma_s^{H_2O} = 2,67 [\text{см}^{-1}];$$

$$\Sigma_{tr}^{H_2O} = 2,31 [\text{см}^{-1}];$$

$$\xi \Sigma_s^{H_2O} = 1,35 [\text{см}^{-1}].$$

Все значения микросечений и макросечений, которые были рассчитаны выше, приведены в таблице А.1. приложения А.

1.4 Расчёт долей материалов в ячейке

Радиус топливной таблетки R имеет значение 0,3785 см.

Площадь сечения ячейки составляет $S_{\text{яч}} = 490,55 \text{ см}^2$.

Площадь сечения прохода теплоносителя $S_{\text{тн}}$, приходящаяся на 1 элемент $0,922 \text{ см}^2$.

Площадь топливной таблетки определяется по формуле:

$$S_{\text{табл}} = \pi R^2 = 3,14 \cdot 0,3785^2 = 0,45 [\text{см}^2].$$

Иногда удобнее пользоваться не площадью компонента, а его долей в общем сечении ячейки:

$$\beta_i = \frac{S_i}{S_{яч}}. \quad (1.15)$$

Расчет долей компонентов в общем сечении ячейки:

1. Для топлива:

$$\beta_{\text{топл}} = \frac{n \cdot S_{\text{табл}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{312 \cdot 0,45}{490,55} = 0,286.$$

2. Для теплоносителя:

$$\beta_{\text{тн}} = \frac{n \cdot S}{S_{\text{яч}}} = \frac{312 \cdot 0,922}{490,55} = 0,586.$$

3. Для конструкционных материалов:

$$\beta_{\text{км}} = 1 - \beta_{\text{тн}} - \beta_{\text{топл}} = 0,128.$$

2 Расчёт «бесконечного» коэффициента размножения k_{∞}

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

Коэффициент размножения для бесконечной среды рассчитывается по формуле четырех сомножителей:

$$K_{\infty} = \mu \cdot \theta \cdot \varphi \cdot \eta, \quad (2.1)$$

где η – коэффициент размножения на тепловых нейтронах в топливе,

μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах,

φ – вероятность избежать резонансного захвата,

θ – коэффициент использования тепловых нейтронов.

Для расчёта k_{∞} вычисляется каждый сомножитель.

2.1 Расчет коэффициента выхода нейтронов на один акт деления η

Топливо применяется в виде сплава и выражение для η имеет вид:

$$\eta = \frac{v_f \cdot \Sigma_f^{\text{топл}}}{\Sigma_a^{\text{топл}}} = \frac{2,42 \cdot 0,4316}{0,552} = 1,892; \quad (2.2)$$

2.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах μ

Величина μ (коэффициент размножения на быстрых нейтронах) в гетерогенном реакторе зависит от формы, размеров и расположения топливного блока, а также от диффузионных свойств топлива.

При расчете величины μ для стержневых и трубчатых ТВЭЛ можно воспользоваться формулой:

$$\mu = \mu_{6л} + \frac{\mu_{\infty} - \mu_{6л}}{1 + 2,3 \cdot \frac{N_H}{N_8}} \quad (2.3)$$

$$\mu_{6л} = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \mu_1; \quad (2.4)$$

где $\mu_{\infty} = 1,19$;

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

$\mu_{\text{бл}}$ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах для одиночного блока.

μ_1 – пористость блока по U^{238} ;

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

Из графика определим P :

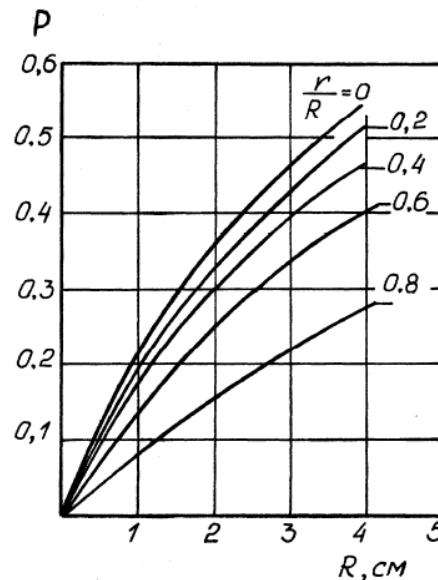


Рисунок 1 – Зависимость P от R

При радиусе $R = 0,3785$ см значение $P = 0,1$.

$$\mu_1 = \frac{N_{U8}}{N_{U8}^{\text{прир}}} = \frac{238 \cdot 2,2186 \cdot 10^{22}}{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 18,7 \cdot 0,9927} = 0,472. \quad (2.5)$$

где N_{U8} – число ядер U^{238} в 1 см^3 блока;

$N_{U8}^{\text{прир}}$ – число ядер U^{238} в 1 см^3 естественного урана.

$$\frac{N_H}{N_8} = 2 \cdot \frac{238 \cdot S_{H_2O} \cdot H_{\text{аз}} \cdot \rho_{H_2O}}{18 \cdot S_{UO_2} \cdot H_{\text{аз}} \cdot \rho_{UO_2}} = 2 \cdot \frac{238 \cdot 0,922 \cdot 0,6989}{10,97 \cdot 0,45 \cdot 18} = 3,64. \quad (2.6)$$

$$\mu_{\text{бл}} = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \cdot \mu_1 = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} \cdot 0,472 = 1,00458. \quad (2.7)$$

$$\mu = \mu_{\text{бл}} + \frac{\mu_{\infty} - \mu_{\text{бл}}}{1 + 2,3 \cdot \frac{N_H}{N_8}} = 1,00458 + \frac{1,19 - 1,00458}{1 + 2,3 \cdot 3,64} = 1,0244. \quad (2.8)$$

2.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов θ

Если все рабочие каналы содержат сборки твэл, то можно использовать метод гомогенизации, при котором все материалы рабочего канала считают равномерно перемешанными.

Реальная ячейка заменяется эквивалентной ячейкой с одним фиктивным цилиндрическим блоком. Фиктивный блок образуется путем гомогенизации всего содержимого рабочего канала (ядерное горючее, конструкционные материалы, теплоноситель).

Расчет θ в этом случае ведут в два этапа. Сначала определяют величину θ'_ϕ – отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов:

$$\theta'_\phi = \left[1 + F \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_a^{\text{зам}}}{S_\phi \cdot \Sigma_a^\phi} + (E - 1) \right]^{-1}, \quad (2.9)$$

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

Необходимые параметры для расчёта:

$$R_\phi = R_{\text{ТВЭЛ}} = 0,455 \text{ [см]}.$$

Площадь фиктивного блока вычисляется по формуле:

$$S_\phi = \pi \cdot R_\phi^2 = 3,14 \cdot 0,455^2 = 0,65 \text{ [см}^2\text{]}. \quad (2.10)$$

$$S_{\text{км}} = S_\phi - S_{\text{топл}} = 0,65 - 0,45 = 0,2 \text{ [см}^2\text{]}. \quad (2.11)$$

$$S_{\text{зам}} = \frac{S_{\text{яч}}}{n} - S_\phi = \frac{367,9136}{312} - 0,65 = 0,922 \text{ [см}^2\text{]}. \quad (2.12)$$

$$R_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{S_{\text{зам}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,922}{3,14}} = 0,542 \text{ [см]}. \quad (2.13)$$

$$\Sigma_a^\phi = \frac{\Sigma_a^{\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}} + \Sigma_a^{\text{км}} \cdot S_{\text{км}}}{S_\phi} = \frac{0,552 \cdot 0,45 + 0,0064 \cdot 0,2}{0,65} = 0,384 \text{ [см}^{-1}\text{]}. \quad (2.14)$$

$$\Sigma_{tr}^\phi = \frac{\Sigma_{tr}^{\text{топл}} \cdot S_{\text{топл}} + \Sigma_{tr}^{\text{км}} \cdot S_{\text{км}}}{S_\phi} = \frac{0,933 \cdot 0,45 + 0,273 \cdot 0,2}{0,65} = 0,73 \text{ [см}^{-1}\text{]}. \quad (2.15)$$

С помощью усреднённых сечений по фиктивному блоку длину диффузии определяется:

$$L_{\Phi} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_a^{\Phi}\Sigma_{tr}^{\Phi}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,384 \cdot 0,73}} = 1,09 \text{ [см]}. \quad (2.16)$$

$$L_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_a^{\text{зам}}\Sigma_{tr}^{\text{зам}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,0221 \cdot 2,31}} = 2,555 \text{ [см]}. \quad (2.17)$$

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

$$(E - 1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\ln \frac{R_{\text{зам}}}{R_{\Phi}} - 0,75 \right) \cdot \left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{зам}}} \right)^2; \quad (2.18)$$

$$(E - 1) = \frac{1}{2} \left(\ln \left(\frac{0,542}{0,455} \right) - 0,75 \right) \cdot \left(\frac{0,542}{2,555} \right)^2 = -0,013.$$

Коэффициент экранирования будет равен:

$$F = \frac{\Phi_{\text{зам}}}{\Phi_{\Phi}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\Phi}}{L_{\Phi}} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_{\Phi}}{L_{\Phi}}\right)}{I_1\left(\frac{R_{\Phi}}{L_{\Phi}}\right)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,455}{1,09} \cdot \frac{I_0\left(\frac{0,455}{1,09}\right)}{I_1\left(\frac{0,455}{1,09}\right)} = 1,0216. \quad (2.19)$$

Тогда получим:

$$\theta'_{\Phi} = \left[1 + F \cdot \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_a^{\text{зам}}}{S_{\Phi} \cdot \Sigma_a^{\Phi}} + (E - 1) \right]^{-1}; \quad (2.20)$$

$$\theta'_{\Phi} = \left[1 + 1,0216 \cdot \frac{0,922 \cdot 0,0221}{0,65 \cdot 0,384} - 0,013 \right]^{-1} = 0,934.$$

Для расчета коэффициента использования тепловых нейтронов определим:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_a^U \cdot S_U}{\Sigma_a^{\Phi} \cdot S_{\Phi}} = \frac{0,552 \cdot 0,45}{0,384 \cdot 0,65} = 0,995. \quad (2.21)$$

В итоге:

$$\theta = \theta_0 \theta'_{\Phi} = 0,995 \cdot 0,934 = 0,93. \quad (2.22)$$

2.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата ф

В энергетических реакторах, как правило, применяются сборки твэлов, которые состоят из нескольких блоков ядерного горючего.

Для ячейки со стержневыми блоками

$$\varphi = \exp\left(-\frac{k_T \cdot R_U \cdot \sqrt{Rn\mu_1} + 0,73 \cdot n \cdot R_U^2 \cdot \mu_1}{\xi \Sigma_S^{\text{зам}} S_{\text{зам}} + \xi \Sigma_S^{\Phi} S_{\Phi}}\right); \quad (2.23)$$

где $\xi \Sigma_S^{\text{зам}}$ и $\xi \Sigma_S^{\Phi}$ – замедляющая способность замедлителя и фиктивного блока;

k_T – температурный коэффициент;

ε_1 – пористость блока по U²³⁸;

$S_{\text{зам}}$ и S_{Φ} – площадь замедлителя и фиктивного блока;

R_U – радиус уранового блока;

n – число ТВЭЛОВ;

R – радиус пучка ТВЭЛОВ.

Коэффициент K_T имеет вид:

$$K_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_U}); \quad (2.24)$$

где T_U – средняя температура урана в кельвинах.

$$K_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{400}) = 1,046;$$

$$R = \frac{d_{\text{яч}}}{2} = \frac{23,8}{2} = 11,9 \text{ [см]}.$$

$$\xi \Sigma_{S_{\Phi}} = \frac{S_{\text{топл}} \cdot \xi \Sigma_{\text{топл}} + S_{\text{км}} \cdot \xi \Sigma_{\text{км}}}{S_{\Phi}}. \quad (2.25)$$

$$\xi \Sigma_{S_{\Phi}} = \frac{0,45 \cdot 0,0227 + 0,2 \cdot 0,0059}{0,65} = 0,0175.$$

Тогда проведя расчет, получим:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{1,046 \cdot 0,3785 \cdot \sqrt{11,9 \cdot 312 \cdot 0,472} + 0,73 \cdot 312 \cdot 0,3785^2 \cdot 0,472}{1,35 \cdot 287,63 + 0,0175 \cdot 0,65}\right) = 0,92.$$

В конечном итоге:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta = 1,0244 \cdot 0,92 \cdot 0,93 \cdot 1,892 = 1,6583.$$

3 Расчёт эффективного коэффициента размножения $k_{эф}$

Эффективный коэффициент размножения реактора вычисляется по формуле:

$$k_{эф} = \frac{k_{\infty} \cdot e^{B^2 \tau_p}}{1 + B^2 \cdot L_p^2}; \quad (3.1)$$

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

B^2 – геометрический параметр;

τ_p – возраст нейтронов в решетке;

L_p^2 – квадрат длины диффузии нейтронов в решетке.

Расчет квадрата длины диффузии для решетки производится по формуле:

$$L_p^2 = (1 - \theta) \cdot L_{зам}^2 + \theta \cdot L_{\phi}^2; \quad (3.2)$$

$$L_p^2 = 6,529 \cdot (1 - 0,93) + 1,09 \cdot 0,93 = 1,47 [\text{см}^2];$$

где $L_{зам}^2$ – квадрат длины диффузии в замедлителе.

Площадь фиктивного блока:

$$S_{\phi} = 3,14 \cdot 0,455^2 = 0,65 [\text{см}^2].$$

Возраст нейтронов в решетке определяется по формуле:

$$\tau_p = \tau_{зам} \cdot \sqrt{\frac{S_{яч}}{S_{зам}}}, \quad (3.3)$$

где $\tau_{зам} = 27,3 \text{ см}^2$ – возраст нейтронов в замедлителе (воде).

Таким образом, возраст нейтронов в решетке:

$$\tau_p = \tau_{зам} \cdot \sqrt{\frac{S_{яч}}{S_{зам}}} = 27,3 \cdot \sqrt{\frac{490,55}{287,63}} = 35,65 [\text{см}^2].$$

Длина миграции в отражателе:

$$M^2 = L_{зам}^2 + \tau_{зам} = 6,529 + 27,3 = 33,829 [\text{см}^2]. \quad (3.4)$$

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40) = 7,2 + 0,1 \cdot (33,829 - 40) = 6,583 [\text{см}]; \quad (3.5)$$

где δ – эффективная добавка за счёт отражателя.

Для цилиндрического реактора геометрический параметр определяется:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H'}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R'}\right)^2; \quad (3.6)$$

где H', R' – эквивалентные размеры реактора.

$$H' = H_{\text{а.з.}} + 2\delta = 363,54 + 2 * 6,583 = 376,71[\text{см}]. \quad (3.7)$$

$$R' = \frac{D}{2} + \delta = \frac{403,94}{2} + 6,583 = 208,552[\text{см}]. \quad (3.8)$$

Тогда, получаем:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{376,71}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{208,552}\right)^2 = 0,0002 [\text{см}^{-2}].$$

Найденные значения подставляем в формулу для эффективного коэффициента размножения:

$$k_{\text{эф}} = \frac{k_{\infty} \cdot e^{B^2 \tau_p}}{1 + B^2 \cdot L_p^2} = \frac{1,6583 \cdot e^{-0,0002 \cdot 35,83}}{1 + 0,0002 \cdot 1,47} = 1,646.$$

4 Расчёт «горячего» реактора

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

При повышении температуры повышается температура нейтронного газа, что приводит к уменьшению сечений поглощения и деления тепловых нейтронов. Повышение температуры приводит к уменьшению плотности материалов вследствие расширения, что ведёт к уменьшению числа ядер в единице объёма и, следовательно, к уменьшению макроскопических сечений. Повышение температуры нейтронного газа вызывает смещение энергии «сшивки» спектров тепловых и замедляющих нейтронов в область больших энергий, что приводит к уменьшению возраста тепловых нейтронов.

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

Всё это приводит к изменению реактивности реактора.

Нагрев реактора сопровождается уменьшением эффективного коэффициента размножения (ТКР), что влечёт устойчивую работу реактора. Положительный ТКР приводит к неустойчивости в работе реактора, при котором его состояние переходит в надкритическое.

Для расчёта горячего ядерного реактора необходимо произвести расчёт следующих величин: температурный эффект реактивности (ТЭР) и ТКР.

ТЭР – интегральная характеристика температуры на реактивность, представляющая собой изменение реактивности при разогреве или расхолаживании ядерного реактора в заданном интервале температур.

$$\rho_T = \rho(T_2) - \rho(T_1) = \frac{k_{эф}(T_2) - k_{эф}(T_1)}{k_{эф}(T_2) \cdot k_{эф}(T_1)}, \quad (4.1)$$

где ρ_T – температурный эффект реактивности,

$\rho(T_1)$ – реактивность при температуре T_1 ,

$\rho(T_2)$ – реактивность при температуре T_2 ,

$k_{эф}(T_1)$ – эффективный коэффициент размножения нейтронов при температуре T_1 ,

$k_{эф}(T_2)$ – эффективный коэффициент размножения нейтронов при температуре T_2 .

ТКР – дифференциальная характеристика влияния температуры на реактивность, представляющая собой изменение реактивности при изменении температуры в ядерном реакторе на один градус.

$$\alpha = \frac{\partial \rho}{\partial T} [^{\circ}\text{C}^{-1}], \quad (4.2)$$

где α – температурный коэффициент реактивности.

Сечения при температуре нейтронного газа определяются следующим образом:

$$\bar{\sigma}_a(T_{н.г.}) = 0,886 \cdot \sigma_{a0} \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}} \cdot f_a(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{гр}) [\text{б}], \quad (4.3)$$

где σ_{a0} – макроскопическое сечение поглощения стандартных нейтронов, б;

$f_a(T_{н.г.})$ – поправочный коэффициент, который характеризует отклонение сечения от закона $1/v$.

Аналогично можно определить σ_f .

Необходимо найти температуру нейтронного газа:

$$T_{н.г.} = T_{раб} \left[1 + 1,4 \frac{\bar{\Sigma}_{аяч}}{\xi \bar{\Sigma}_{сяч}} \right] [K], \quad (4.4)$$

где $T_{раб}$ – рабочая температура теплоносителя.

$$T_{раб} = \frac{T_{вых} + T_{вх}}{2} [K], \quad (4.5)$$

где $T_{вых}$ – температура теплоносителя на выходе из активной зоны,

$T_{вх}$ – Температура теплоносителя перед попаданием в активную зону.

$$T_{раб} = \frac{601,8 + 570,2}{2} = 586 [K],$$

$$T_{н.г.} = 586 \cdot \left[1 + 1,4 \cdot \frac{0,1718}{0,7988} \right] = 762,4 [K].$$

Вводим поправки на сечения с учётом температуры нейтронного газа.

$$f_{\text{гр}}(\chi_{\text{гр}}) = \frac{\chi_{\text{гр}}^2 e^{-\chi_{\text{гр}}}}{1 - (1 + \chi_{\text{гр}}) e^{-\chi_{\text{гр}}}} = \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s}. \quad (4.6)$$

Из формулы выше графически определяется значение $\chi_{\text{гр}}$ с помощью рисунка 4.

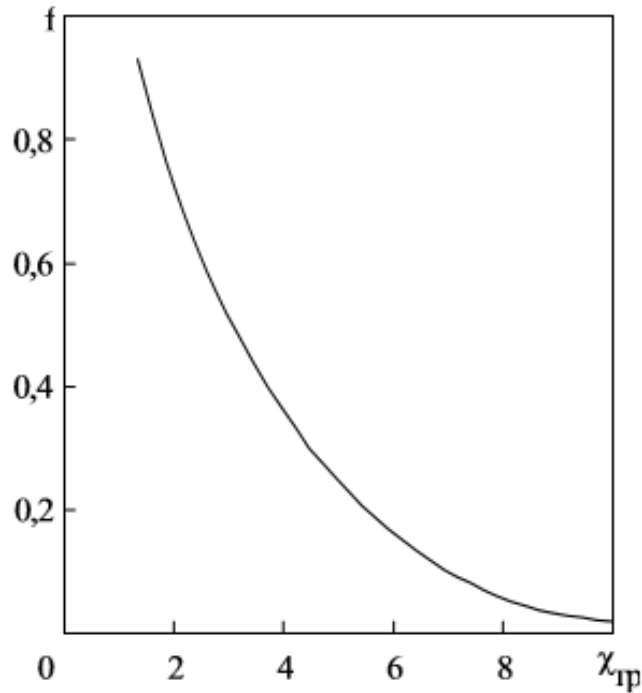


Рисунок 4 – график функции $f(\chi_{\text{гр}})$ для определения границы тепловой группы

Графически определяем, что $\chi_{\text{гр}} = 5,3$.

Далее, с помощью уже известного значения $\chi_{\text{гр}}$, графически определяем значение $F(\chi_{\text{гр}})$ по рисунку 5.

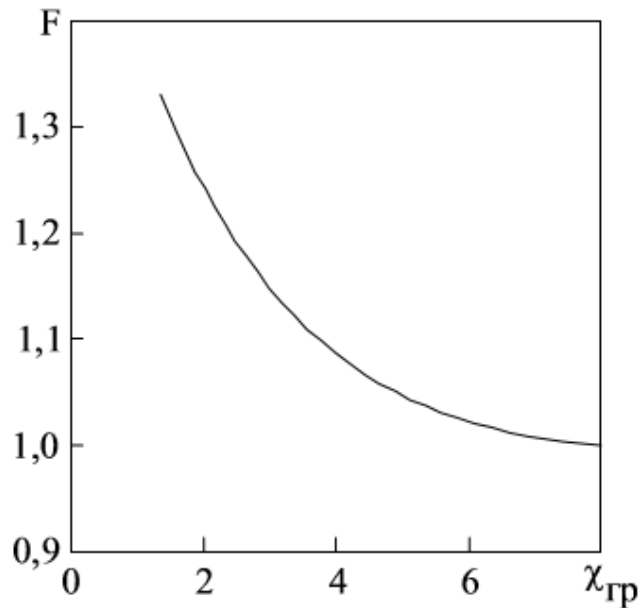


Рисунок 5 – график функции $F(\chi_{гр})$ для усреднения сечений поглощения по спектру Максвелла

Графически определяем, что $F(\chi_{гр}) = 1,04$.

Величины сечений рассчитываются по формуле (1.3) уже с учётом множителя $F(\chi_{гр})$.

Так же необходимо ввести поправки на возраст нейтронов и длину диффузии:

$$\tau_{гор} = \frac{\tau_{H_2O}}{\rho_{H_2O} \frac{V_{H_2O}}{V_{яч}} (1 - \frac{V_{H_2O}}{V_{яч}} (1 - \rho_{H_2O}))^{1,5}} [\text{см}^2], \quad (4.7)$$

$$L_{гор}^2(T) = L_{зам}^2(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0,48} [\text{см}^2]. \quad (4.8)$$

В итоге эффективный коэффициент размножения для горячего реактора будет равен

$$k_{эф}^{гор} = \frac{k_{\infty}^{гор} \cdot e^{-B^2 \tau_{гор}}}{1 + L_{гор}^2 B^2}. \quad (4.9)$$

$$\tau_{гор} = \frac{27,3}{0,6989 \cdot 0,5863 (1 - 0,5863 (1 - 0,6989))^{1,5}} = 89,1537 [\text{см}^2].$$

$$L_{гор}^2(T) = 6,5294 \cdot \left(\frac{586}{293}\right)^{0,48} = 9,099 [\text{см}^2].$$

Найдём ТЭР:

$$\rho_T = \frac{k_{\text{эф}}(586) - k_{\text{эф}}(293)}{k_{\text{эф}}(586) \cdot k_{\text{эф}}(293)} = \frac{1,5476 - 1,6492}{1,5476 \cdot 1,6492} = -0,0398.$$

Для нахождения ТКР воспользуемся формулой:

$$\alpha = \frac{k_{\text{эф}}(586) - k_{\text{эф}}(293)}{586 - 293} = -3,46 \cdot 10^{-4} [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (4.10)$$

Макроскопические сечения взаимодействия холодного и горячего реактора указаны в таблице 5.

Таблица 5 – макроскопические сечения взаимодействия

Сечения	Холодного	Горячего
$\Sigma_a^{\text{ТОПЛ}}, \text{см}^{-1}$	0,5520	0,4154
$\Sigma_a^{\text{К.М.}}, \text{см}^{-1}$	0,0064	0,0046
$\Sigma_f^{\text{ТОПЛ}}, \text{см}^{-1}$	0,4313	0,3216
$\Sigma_s^{\text{ТОПЛ}}, \text{см}^{-1}$	0,3889	0,3891
$\Sigma_s^{\text{К.М.}}, \text{см}^{-1}$	0,2694	0,2689
$\Sigma_{\text{тр}}^{\text{ТОПЛ}}, \text{см}^{-1}$	0,9330	0,7975
$\Sigma_{\text{тр}}^{\text{К.М.}}, \text{см}^{-1}$	0,2730	0,2708
$\Sigma_t^{\text{ТОПЛ}}, \text{см}^{-1}$	0,9531	0,8045
$\Sigma_t^{\text{К.М.}}, \text{см}^{-1}$	0,2758	0,2735

5 Многогрупповой расчёт

Спектр нейтронов в ядерном реакторе представляет собой спектр нейтронного деления, смягчённого эффектами неупругого и упругого замедления на тяжёлых, средних и лёгких ядрах.

Эффективным методом расчёта 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 группы сечения ядерных процессов считаются независимыми от энергий нейтронов.

Предполагается, что для каждой группы могут быть рассмотрены односкоростное кинетическое уравнение в диффузионном приближении и сопряжённое ему уравнение ценности нейтронов, описывающие баланс нейтронов и ценностей в объёме реактора.

Определив групповые значения σ_0 , в дополнительных таблицах находим коэффициенты f и среднегрупповые значения данного элемента для рассматриваемой среды:

$$\bar{\sigma}_{c,f,z} = \sigma_{c,f,z} f_{c,f,l}(\sigma_0, T) \text{ [6]}. \quad (5.1)$$

Здесь $f_{c,f,l}$ – коэффициенты, учитывающие влияние резонансной самоэкранировки, соответственно, на среднегрупповые значения сечения захвата, деления, упругого замедления.

Данные поправки необходимы при подготовке сечений для ^{235}U .

Далее определяется сечение замедления, которое складывается из сечения упругого и сечения неупругого замедления:

$$\sigma_z = \sigma_{z(l)} + \sigma_{z(in)} \text{ [6]}. \quad (5.2)$$

Для тяжёлых элементов, когда упругое замедление вызывает переход в одну соседнюю нижнюю группу, суммарные сечения переходов равны:

$$\sigma_z(i, i+1) = \sigma_{z(l)i} + \sigma_{in}(i, i+1) \text{ [6]} \quad (5.3)$$

И

$$\sigma_3(i, i + k) = \sigma_{in}(i, i + k) [6]. \quad (5.4)$$

Для лёгких элементов

$$\sigma_3(i, i + k) = \sigma_l(i, i + k) [6]. \quad (5.5)$$

Полный баланс нейтронов и ценностей в активной зоне реактора записывается для k-ой энергетической группы в следующем виде:

$$J_k - \Sigma_a^k I^k - \Sigma_3^k I^k + \sum_{i=1}^{k-1} \Sigma_3^{ik} I^i + \varepsilon_k \sum_{j=1}^m \frac{\nu_f^j \Sigma_f^j I^j}{k_{эф}} = 0; \quad (5.6)$$

$$J_k^+ - \Sigma_a^k I_k^+ - \Sigma_3^k I_k^+ + \sum_{i=k+1}^m \Sigma_3^{ik} I_i^+ + \frac{\nu_f^k \Sigma_f^k}{k_{эф}} \sum_{j=1}^m \varepsilon_j I_j^+ = 0; \quad (5.7)$$

где I^k и I_k^+ являются интегральными потоками и ценностями нейтронов k-й группы в рассматриваемом объёме активной зоны;

I^k и I_k^+ – полные утечки нейтронов и ценностей из объёма активной зоны, определяемые для эквивалентного голого реактора по соотношениям:

$$J_k = B^2 D^k I^k, \quad (5.8)$$

$$J_k^+ = B^2 D^k I_k^+. \quad (5.9)$$

Для цилиндрической активной зоны:

$$B^2 = \left(\frac{2,405}{R_3} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H_3} \right)^2 [\text{см}^{-2}]. \quad (5.10)$$

Групповой коэффициент диффузии в активной зоне:

$$D^k = \frac{1}{3 \Sigma_{tr}^k} [\text{см}]. \quad (5.11)$$

Полное сечение замедления за счёт тепловых переходов в нижележащие группы из k-й группы:

$$\Sigma_3^k = \sum_{i=k+1}^m \Sigma_3^{ki} [\text{см}^{-1}]. \quad (5.12)$$

Расчёт спектров потоков и ценностей в активной зоне ведётся по следующей схеме.

Для потоков

Предполагая геометрический параметр B^2 заданным и, воспользовавшись соотношением

$$k_{эф} = \sum_{j=1}^m \nu_f^j \Sigma_f^j I^j, \quad (5.13)$$

решим уравнение относительно I^k :

$$I^k = \frac{\varepsilon_k + \sum_{i=1}^{k-1} \Sigma_3^{ik} I^i}{\Sigma_{yB}^k + B^2 D^k}, \quad (5.14)$$

причём полное сечение увода нейтронов из k-й группы:

$$\Sigma_{yB}^k = \Sigma_a^k + \Sigma_3^k [\text{см}^{-1}]. \quad (5.15)$$

Уравнение для k = 1 примет вид

$$I^1 = \frac{\varepsilon_1}{\Sigma_{yB}^1 + B^2 D^1}. \quad (5.16)$$

Приведём пример расчёта для шестой группы:

$$\begin{aligned} I^6 &= \frac{\varepsilon_6 + \Sigma_3^1 I^1 + \Sigma_3^2 I^2 + \Sigma_3^3 I^3 + \Sigma_3^4 I^4 + \Sigma_3^5 I^5 + \Sigma_3^6 I^6}{\Sigma_{yB}^6 + B^2 D^6} = \\ &= \frac{0,14 + 0,01 \cdot 0,27 + 0,01 \cdot 1,27 + 0,015 \cdot 2,57 + 0,025 \cdot 4,15 + 0,07 \cdot 3,62}{0,137 + 0,0005} = \\ &= 4,01. \end{aligned}$$

График распределения для потоков представлен в приложении В.

Для ценностей

Расчёт спектра ценностей производится в обратном порядке, т.е. начиная с k = m, при этом получаем

$$k_{\text{эф}} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_j I_j^+. \quad (6.17)$$

Решим относительно I_k^+ :

$$I_k^+ = \frac{v_f^k \Sigma_f^k + \sum_{i=k+1}^m \Sigma_3^{ik} I_i^+}{B^2 D^k + \Sigma_{yB}^k}. \quad (6.18)$$

При k = m величина I_k^+ определяется следующим образом:

$$I_m^+ = \frac{v_f^m \Sigma_f^m}{B^2 D^m + \Sigma_{yB}^m}. \quad (6.19)$$

Приведём пример расчёта ценностей для 22 группы:

$$\begin{aligned} I_{22}^+ &= \frac{v_f^{22} \Sigma_f^{22} + \Sigma_3^{23} I_{23}^+ + \Sigma_3^{24} I_{24}^+ + \Sigma_3^{25} I_{25}^+ + \Sigma_3^{26} I_{26}^+}{B^2 D^{22} + \Sigma_{yB}^{22}} = \\ &= \frac{0,014 + 1,876 \cdot 0,2256 + 1,888 \cdot 0,097 + 1,887 \cdot 0,045 + 1,901 \cdot 0,039}{0,417 + 0,00025} = \\ &= 1,868. \end{aligned}$$

График распределения для ценностей представлен в приложении В.

Приравняем между собой (7.13) и (7.17), тогда получим:

$$1,4104 \approx 1,4266.$$

Небольшие расхождения можно объяснить тем, что поправки на сечения выполнены недостаточно точно.

Значения многогрупповых констант предоставлены в приложении 4.

6 Расчёт нуклидного состава топлива

Целью исследований, проводимых в рамках настоящей работы является построение модели кинетики изотопного состава облученного ядерного топлива реактора типа ВВЭР. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- формирование цепочек ядерных реакций, показывающие взаимодействия продуктов реакции деления с нейтронами;
- разработка математической модели, реализующей расчет изменений ядерных концентраций нуклидов цепочек в облученном топливе;
- разработка программных средств для подготовки констант;
- расчет отравления, а именно время достижения равновесной концентрации Xe и Sm , расчет «йодной ямы»;
- оценка полученных результатов.

6.1 Цепочки ядерных превращений в облученном ядерном топливе

Цепочки ядерных превращений представляют собой взаимосвязи между нуклидами, которые образуются в топливе за счет радиоактивного распада, изомерных переходов и нейтронных реакций. Для целей построения цепочек рассматривались только основные виды радиоактивного β -распада, который сопровождается испусканием запаздывающего нейтрона. Влияние α -распада учитывалось только при уменьшении концентрации излучателя альфа-частиц (если период полураспада $< 10^6$ лет) без установления взаимосвязей с дочерними элементами.

При построении взаимосвязей, обусловленных нейтронными реакциями, учитывалась только реакция радиационного захвата. Пороговые реакции с образованием тяжёлых частиц 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.

6.2 Построение цепочек ядерных превращений

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.).

Задача построения цепочек ядерных превращений в общем случае формулируется таким образом: для заданного радионуклида $(Z-A-I)_0$ найти все нуклиды, которые образуются в процессе его распада и при его взаимодействии с нейтроном.

С точки зрения математики 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.

Построение данного направленного графа и является задачей построения цепочки ядерных реакций.

Пусть необходимо построить цепочку распада нуклида $Z-A-I$. Каждый шаг рекурсии включает в себя следующие пункты:

- цепочка ядерных превращений начинает строиться с самого легкого нуклида с наименьшим зарядом, имеющим вероятность образования в реакции деления;
- далее рассматриваются все нуклиды с текущим Z по мере возрастания атомной массы. Если нуклид нестабильный, то по данным о типах его распада строится список дочерних нуклидов.

Если нуклид стабилен, то необходимо знать, 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 6. 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 8.1, 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.

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

6.4 Модель накопления изотопов в облученном ядерном топливе

Рассмотрим кинетику накопления изотопов в составе облученного ядерного топлива. В условиях эксплуатации топлива в ядерном реакторе ВВЭР, при времени облучения несколько суток, полагали, параметры нейтронного потока стационарными и не имеющими пространственного распределения. 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.

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

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i N_i - \sigma_i^a \Phi N_i + \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_{ji} N_j + \sum_{j=1}^{i-1} \sigma_{ji}^c \Phi N_j + \delta_i^5 \sigma_{U^5}^f \Phi N_{U^5}; \quad (6.1)$$

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:

$$N(t=0) = N_{0i}. \quad (6.2)$$

Система уравнений (6.1) 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 (6.1) нужно добавить слагаемое вида $\delta_i^9 \sigma_{Pu^9}^f \Phi N_{Pu^9}$.

Для формирования системы уравнений (6.1) 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 (6.1):

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

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

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

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

получим

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i^* N_i + \sum_{j=0}^{i-1} \lambda_{ji}^* N_j. \quad (6.3)$$

Если искать решение системы уравнений (6.3) в виде:

$$N_i = a_{ii} E_i + \sum_{j=0}^{i-1} a_{ij} E_j; \quad (6.4)$$

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

$$\sum_{j=0}^{i-1} N_j = \sum_{j=0}^{i-1} \left[E_j \sum_{k=j}^{i-1} \lambda_{kj}^* a_{ik} \right]. \quad (6.5)$$

Соответственно первое слагаемое в решении (6.4) $N_i^{(i)} = a_{ii} E_i$ - общее решение однородного уравнения

$$\frac{dN_i^{(i)}}{dt} + \lambda_i^* N_i^{(i)} = 0, \quad (6.6)$$

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

$$\frac{dN_i^{(j)}}{dt} + \lambda_i^* N_i^{(j)} = E_j \sum_{k=j}^{i-1} \lambda_{kj}^* a_{ik}. \quad (6.7)$$

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

$$N_i = A_{ij} E_i; \quad (6.8)$$

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

Коэффициенты матрицы A_i определяем при решении уравнений (6.6), (6.7) и начальных условий (6.2).

Решение:

При $i=0$:

$$\frac{dN_0}{dt} = -\lambda_0^* N_0 \Rightarrow N_0 = N_{00} \exp(-\lambda_0^* t).$$

Обозначим $a_{00} = N_{00}$; $E_0 = \exp(-\lambda_0^* t)$, тогда $N_0 = a_{00} E_0$.

При $i=1$:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1^* N_1 + \lambda_{01}^* N_0; \\ N_1^* &= a_{11} \exp(-\lambda_1^* t) = a_{11} E_1; \\ N_1^{**} &= a_{10} \exp(-\lambda_0^* t) = a_{10} E_0; \\ N_1 &= N_1^* + N_1^{**} = a_{11} E_1 + a_{10} E_0. \end{aligned}$$

Найдём коэффициенты a_{10}, a_{11} :

$-\lambda_0^* a_{10} E_0 = -\lambda_1^* a_{10} E_0 + \lambda_{01}^* a_{00} E_0$, тогда:

$$a_{10} = \frac{\lambda_{01}^*}{\lambda_1^* - \lambda_0^*} a_{00};$$

$$N_1 = a_{11} E_1 + a_{10} E_0.$$

Из начальных условий при $t=0$ $N_1 = N_{10}$, отсюда

$$N_{10} = a_{11} + a_{10};$$

$$a_{11} = N_{10} - a_{10}.$$

При $i=2$:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2^* N_2 + \lambda_{12}^* N_1 + \lambda_{02}^* N_0;$$

$$N_2^* = a_{22} \exp(-\lambda_2^* t) = a_{22} E_2;$$

$$N_2^{**} = a_{21} \exp(-\lambda_1^* t) = a_{21} E_1;$$

$$N_2^{***} = a_{20} \exp(-\lambda_0^* t) = a_{20} E_0.$$

Найдём коэффициенты a_{20}, a_{21}, a_{22} :

$$-\lambda_1^* a_{21} E_1 = -\lambda_2^* a_{21} E_1 + \lambda_{12}^* a_{11} E_1, \text{ таким образом:}$$

$$a_{21} = \frac{\lambda_{12}^*}{\lambda_2^* - \lambda_1^*} a_{11};$$

$$-\lambda_0^* a_{20} E_0 = -\lambda_2^* a_{20} E_0 + \lambda_{12}^* a_{10} E_0 + \lambda_{02}^* a_{00} E_0, \text{ тогда:}$$

$$a_{20} = \frac{\lambda_{12}^*}{\lambda_2^* - \lambda_0^*} a_{10} + \frac{\lambda_{02}^*}{\lambda_2^* - \lambda_0^*} a_{00};$$

$$N_2 = a_{22} E_2 + a_{21} E_1 + a_{20} E_0.$$

Из начальных условий при $t=0$ $N_2 = N_{20}$, отсюда

$$N_{20} = a_{22} + a_{21} + a_{20};$$

$$a_{22} = N_{20} - a_{21} - a_{20}.$$

При $i=3$:

$$\frac{dN_3}{dt} = -\lambda_3^* N_3 + \lambda_{23}^* N_2 + \lambda_{13}^* N_1 + \lambda_{03}^* N_0$$

Найдём коэффициенты $a_{30}, a_{31}, a_{32}, a_{33}$:

$$-\lambda_2^* a_{32} E_2 = -\lambda_3^* a_{32} E_2 + \lambda_{23}^* a_{22} E_2, \text{ таким образом:}$$

$$a_{32} = \frac{\lambda_{23}^*}{\lambda_3^* - \lambda_2^*} a_{22};$$

$$-\lambda_1^* a_{31} E_1 = -\lambda_3^* a_{31} E_1 + \lambda_{23}^* a_{21} E_1 + \lambda_{13}^* a_{11} E_1, \text{ тогда:}$$

$$a_{31} = \frac{\lambda_{23}^*}{\lambda_3^* - \lambda_1^*} a_{21} + \frac{\lambda_{13}^*}{\lambda_3^* - \lambda_1^*} a_{11};$$

$$-\lambda_0^* a_{30} E_0 = -\lambda_3^* a_{30} E_0 + \lambda_{23}^* a_{20} E_0 + \lambda_{13}^* a_{10} E_0 + \lambda_{03}^* a_{00} E_0,$$

отсюда:

$$a_{30} = \frac{\lambda_{23}^*}{\lambda_3^* - \lambda_0^*} a_{20} + \frac{\lambda_{13}^*}{\lambda_3^* - \lambda_0^*} a_{10} + \frac{\lambda_{03}^*}{\lambda_3^* - \lambda_0^*} a_{00};$$

$$N_3 = a_{33}E_3 + a_{32}E_2 + a_{31}E_1 + a_{30}E_0.$$

Из начальных условий при $t=0$ $N_3=N_{30}$, значит

$$N_{30} = a_{30} + a_{31} + a_{32} + a_{33};$$

$$a_{33} = N_{30} - a_{32} - a_{31} - a_{30}.$$

Таким образом, система уравнений (6.8) имеет следующее аналитическое решение:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_i = \sum_{j=0}^i a_{ij} E_j; \\ a_{ij} = \frac{\sum_{k=j}^{i-1} \lambda_{ki}^* a_{ik}}{\lambda_i^* - \lambda_j^*}, \quad \text{при } i < j \\ a_{ii} = N_{0i} - \sum_{k=0}^{i-1} a_{ik}; \\ a_{ij} = 0, \quad \text{при } i > j \end{array} \right. \quad (6.9)$$

Сведения о структуре цепочек и 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.

6.5 Отравление реактора

6.5.1 Расчёт отравления реактора при помощи программного модуля

Отравлением называется изменение реактивности вследствие поглощения нейтронов короткоживущими ядрами. Важнейшим из отравляющих продуктов является Xe^{135} , имеющий очень большое сечение поглощения ($\sigma_{Xe} = 2,75 \cdot 10^6$ барн). После Xe^{135} наиболее сильным из вредных поглотителей нейтронов является изотоп Sm^{149} . Самарий обладает большим сечением поглощения, достигающим значения $\sigma_{Sm} = 59200$ барн. Вследствие значительной концентрации и высокого сечения поглощения Sm^{149} по степени и характеру воздействия на реактивность занимает особое положение среди шлаков и скорее приближается к отравляющим продуктам. Поэтому поглощение нейтронов самарием часто называют отравлением.

Произведём расчёт отравления реактора с помощью программного модуля. Задаются следующие данные: начальная концентрация урана в топливе, обогащение топлива, плотность потока нейтронов, время облучения и жёсткости спектра.

Графики зависимостей концентраций нуклидов при разных жёсткостях спектра представлены в приложении Г.

6.5.2 Расчёт отравления реактора по известным формулам

Плотность потока нейтронов по реактору:

$$\Phi = \frac{N}{E_f \cdot \Sigma_f \cdot V_{az} \cdot \beta_{монл}} = \frac{3,3 \cdot 10^6}{0,3251 \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 4,66 \cdot 10^7 \cdot 0,28625} = 2,38 \cdot 10^{13} \text{ [см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}\text{]}.$$

Равновесные концентрации ксенона (N_{Xe}^{cm}), йода (N_I^{cm}), прометия (N_{Pm}^{cm}) и самария (N_{Sm}^{cm}) полагая, что ядерный реактор после пуска был мгновенно выведен на номинальную мощность, определяются следующим образом:

$$N_I^{cm} = \frac{\omega_I \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_I} = \frac{0,056 \cdot 0,3251 \cdot 2,38 \cdot 10^{13}}{2,87 \cdot 10^{-5}} = 1,51 \cdot 10^{16} \text{ [см}^{-3}\text{]},$$

$$N_{Xe}^{cm} = \frac{(\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}} = \frac{(0,056 + 0,003) \cdot 0,3251 \cdot 2,38 \cdot 10^{13}}{2,11 \cdot 10^{-5} + 3,27 \cdot 10^{13} \cdot 1,414 \cdot 10^{-18}} = 5,28 \cdot 10^{15} \text{ [см}^{-3}\text{]},$$

$$N_{Pm}^{cm} = \frac{\omega_{Pm}}{\lambda_{Pm}} \cdot \Sigma_{fтопл} \cdot \Phi = \frac{0,013}{3,850 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,3251 \cdot 2,38 \cdot 10^{13} = 2,51 \cdot 10^{16} \text{ [см}^{-3}\text{]},$$

$$N_{Sm}^{cm} = \frac{\omega_{Pm}}{\sigma_{aSm}} \cdot \Sigma_{fтопл} = \frac{0,013}{5,92 \cdot 10^{-20}} \cdot 0,3251 = 7,14 \cdot 10^{16} \text{ [см}^{-3}\text{]}.$$

6.5.3 Потери реактивности при отравлении ксеноном

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

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

где ρ_{Xe}^{cm} – потери реактивности при достижении ксеноном равновесной концентрации.

$$\rho_{Xe}^{cm} = -\theta \cdot (\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \frac{\sigma_{Xe}}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \cdot \Phi} \cdot \frac{\Sigma_{fмонл}}{\Sigma_{aмонл}} \cdot \Phi =$$

$$= -0,9562 \cdot (0,053 + 0,003) \cdot \frac{1,414 \cdot 10^{-18}}{2,11 \cdot 10^{-5} + 1,414 \cdot 10^{-18} \cdot 2,38 \cdot 10^{13}} \cdot \frac{0,3251}{0,4154} \cdot 2,38 \cdot 10^{13} = -0,0317$$

Соотношение потери реактивности при отравлении Sm :

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

$$\rho_{Sm}^{cm} = \frac{-\omega_{Pm} \cdot \theta \cdot \Sigma_{fTOPII}}{\Sigma_{aTOPII}} = \frac{-0,0130 \cdot 0,9562 \cdot 0,3251}{0,4154} = -0,00923.$$

6.5.4 Расчет «Йодной ямы» при полном останове реактора, работающего на номинальной мощности

После остановки или снижения мощности происходят временное увеличение концентрации Xe вследствие распада I и уменьшение выгорания Xe . После останова реактора, концентрации I, Xe, Pm и Sm будут определяться из следующих соотношений:

$$N_I(t) = N_{0I} \cdot e^{-\lambda_I \cdot t},$$

$$N_{Xe}(t) = N_{0Xe} \cdot e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} + \frac{N_{0I}}{1 - (\lambda_{Xe} / \lambda_I)} \cdot (e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} - e^{-\lambda_I \cdot t}),$$

$$N_{Pm}(t) = N_{0Pm} \cdot e^{-\lambda_{Pm} \cdot t},$$

$$N_{Sm}(t) = N_{0Sm} - N_{0Pm} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}).$$

Изменение реактивности после остановки реактора определяется по следующей формуле:

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

$$= -0,03452 \cdot \left[\frac{2,11 \cdot 10^{-5} + 1,414 \cdot 10^{-18} \cdot 3,27 \cdot 10^{13}}{2,11 \cdot 10^{-5} - 2,87 \cdot 10^{-5}} \cdot (e^{-2,87 \cdot 10^{-5} \cdot t} - e^{-2,11 \cdot 10^{-5} \cdot t}) + e^{-2,11 \cdot 10^{-5} \cdot t} \right].$$

$$\rho_{n.n.} = \rho_{Sm}^{cm} \cdot \frac{\sigma_{Sm}}{\lambda_{Pm}} \cdot \Phi \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}) = -0,00923 \cdot \frac{5,92 \cdot 10^{-20}}{3,85 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,38 \cdot 10^{13} \cdot (1 - e^{-3,85 \cdot 10^{-6} \cdot t})$$

$$= -3,378 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-3,85 \cdot 10^{-6} \cdot t})$$

Изменение реактивности из-за отравления ядерного реактора ксеноном после останова ЯР представлено в приложении В.

Время достижения максимальной глубины «йодной ямы» составляет:

$$t_{й.я.}^{\max} = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \cdot \ln \left(\frac{\lambda_I \cdot \lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}}{\lambda_{Xe} \cdot \lambda_I + \Phi \cdot \sigma_{Xe}} \right) \cdot \frac{1}{3600} = \frac{1}{2,87 \cdot 10^{-5} - 2,11 \cdot 10^{-5}} \cdot \ln \left(\frac{2,87 \cdot 10^{-5} \cdot 2,11 \cdot 10^{-5} + 1,414 \cdot 10^{-18} \cdot 2,38 \cdot 10^{13}}{2,11 \cdot 10^{-5} \cdot 2,87 \cdot 10^{-5} + 1,414 \cdot 10^{-18} \cdot 2,38 \cdot 10^{13}} \right) \cdot \frac{1}{3600} = 8,2 \text{ ч.}$$

При этом потери реактивности составляет:

$$\rho_{Xe}^{ост}(t_{й.я.}^{\max}) = \rho_{Xe}^{cm} \cdot \left[\frac{\lambda_{Xe} + \Phi \cdot \sigma_{Xe}}{\lambda_{Xe} - \lambda_I} \cdot (e^{-\lambda_I \cdot t_{й.я.}^{\max}} - e^{-\lambda_{Xe} \cdot t_{й.я.}^{\max}}) + e^{-\lambda_{Xe} \cdot t_{й.я.}^{\max}} \right] =$$

$$= -0,03452 \cdot \left[\frac{2,11 \cdot 10^{-5} + 1,414 \cdot 10^{-18} \cdot 2,38 \cdot 10^{13}}{2,11 \cdot 10^{-5} - 2,87 \cdot 10^{-5}} \cdot (e^{-2,87 \cdot 10^{-5} \cdot t_{й.я.}^{\max}} - e^{-2,11 \cdot 10^{-5} \cdot t_{й.я.}^{\max}}) + e^{-2,11 \cdot 10^{-5} \cdot t_{й.я.}^{\max}} \right].$$

6.5.5 Оценка результатов

При сравнении результатов расчётов отравления с помощью программного модуля и с помощью решения известных дифференциальных уравнений был сделан вывод, что числовые значения, полученные при расчёте отравления разными методами, практически схожи.

7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

7.1 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 6 – 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.

7.2 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 7. 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:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (7.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{k1}	B_{k2}	K_{ϕ}	K_{k1}	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 концентрата, 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-1500 ($B_{к1}$) и ВВЭР-1000 ($B_{к2}$). Из анализа видно, что разрабатываемая ЯЭУ имеет довольно большое число преимуществ, но в основном показатели разрабатываемой ЯЭУ похожи на показатели для отечественного РБМК-1500 ($B_{к1}$). Не маловажным фактом является то, что разрабатываемая установка единственная в своем роде и представительства на рынке не имеет.

7.3 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:

- доступность и обработанность технологии воды;
- большие удельная и объемная мощности при относительно небольших габаритах и умеренных критических нагрузок реактора;
- высокая замедляющая способность воды в сочетании со слабым рассеянием нейтронов водородом при больших энергиях, позволяет обеспечить глубокое выгорание при умеренных обогащениях топлива;

– высокая степень внутренней устойчивости благодаря отрицательному плотностному коэффициенту реактивности.

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:

- большое сечение поглощения нейтронов, что приводит к использованию обогащенного топлива;
- высокое давление при энергетически приемлемых температурах;
- коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом, что заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы;
- ограничение тепловых потоков из-за кризиса теплосъема.

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 8 представлен SWOT-анализ в виде таблицы.

Таблица 8 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. доступность и обработанность технологии воды. С2. большие удельная и объемная мощности при относительно небольших габаритах и умеренных критических нагрузках реактора. С3. высокая замедляющая способность воды в сочетании со слабым рассеянием нейтронов водородом при больших энергиях, позволяет обеспечить глубокое выгорание при умеренных обогащениях топлива. С4. высокая степень внутренней устойчивости благодаря отрицательному плотностному коэффициенту реактивности.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. большое сечение поглощения нейтронов, что приводит к использованию обогащенного топлива. Сл2. высокое давление при энергетически приемлемых температурах. Сл3. коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом, что заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы. Сл4. ограничение тепловых потоков из-за кризиса теплосъема.
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 8

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.

7.4 Планирование научно-исследовательских работ

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 9.

Таблица 9 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность исполнителя
Подготовительный	1	Составление и утверждение научного задания	Бакалавр Руководитель
	2	Подбор и изучение материалов по теме	Бакалавр
Исследование и анализ предметной области	3	Анализ исходных данных	Бакалавр
	4	Выбор метода выполнения работы	Бакалавр Руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Бакалавр
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Применение выбранного метода к данным	Бакалавр
Обобщение и оценка результатов	7	Анализ результатов работы	Бакалавр
	8	Определение целесообразности проведения НИР	Бакалавр Руководитель
	9	Составление пояснительной записке к ВКР.	Бакалавр
	10	Оформление пояснительной записки к ВКР по ГОСТу.	Бакалавр

7.5 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:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (7.2)$$

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 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (7.3)$$

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.

7.6 Разработка графика проведения научного исследования

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

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (7.4)$$

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:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (7.5)$$

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.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{366 - 102 - 16} = 1,48.$$

Таблица 10 – Временные показатели осуществления комплекса работ

№ рабо ТЫ	Продолжительность работ			Исполнители	t_{pi} , человеко- дни	t_{ki} , человеко- дни
	$t_{\min i}$, челове ко-дни	$t_{\max i}$, челове ко-дни	$t_{\text{ож} i}$, челове ко-дни			
1	1	3	2	Б, Р	1	1
2	14	18	16	Б	16	23
3	7	12	9	Б	9	13
4	3	6	4	Б, Р	2	3
5	2	5	3	Б	3	4
6	10	16	12	Б	12	17
7	5	7	6	Б	6	9
8	3	5	4	Б, Р	2	3
9	5	11	7	Б	7	10
10	4	7	5	Б	5	7

Календарный план-график выполнения работ представим в виде таблицы в приложении Д.

7.7 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

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

- материальные затраты НТИ;

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

7.7.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_{\text{м}} = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{\text{расх}i}, \quad (7.6)$$

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

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

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

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

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 10.

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

$$C = \Pi_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 2,7 \cdot 0,9 \cdot 900,0 = 2187, \quad (7.7)$$

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 11 – 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

7.7.2 Основная заработная плата исполнителей темы

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

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (7.8)$$

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (7.9)$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m}{F_d}, \quad (7.10)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

F_d – количество рабочих дней в месяце.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) k_p, \quad (7.11)$$

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

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

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

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 г.Томск.

Пример расчета заработной платы для руководителя:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_o) k_p = 15500 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 30225 \text{ [руб]}.$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_m}{T_p} = \frac{30225}{21} = 1439,3 \text{ [руб]}.$$

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 1439,3 \cdot 7 = 10075,11 \text{ [руб]}.$$

Таблица 12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб	T_p , дни	$Z_{осн}$, руб
Руководитель	15500	1,3	45366,48	2160,31	7	10075,11
Бакалавр	2730	1,3	5323,5	235,5	37,5	8812,5
ИТОГО						18887,61

7.7.3 Дополнительная заработная плата

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (7.12)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таблица 13 – Расчет дополнительной заработной платы

Исполнители	Основная ЗП,руб	Дополнительная ЗП,руб
Руководитель (доцент)	10075,11	1511,27
Бакалавр	8812,5	1321,88
ИТОГО		2833,15

7.7.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды являются обязательными по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (7.13)$$

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

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

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Основная ЗП, руб	Дополнительная ЗП, руб
Руководитель	10075,11	1511,27

Продолжение таблицы 14

Бакалавр	8812,5	1321,88
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	-
ИТОГО		5886,33

7.7.5 Расчет затрат на научные и производственные командировки

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных тарифов. В данном дипломном проекте таких затрат нет.

7.7.6 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают в себя затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями.

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работы и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками. Контрагентные расходы составляют 10% от основной и дополнительной заработной платы. В данном дипломном проекте таких затрат нет.

7.7.7 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергия, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} + З_{\text{внеб}} + З_{\text{мат}}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (7.14)$$

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

$$З_{\text{накл}} = 27607,09 \cdot 0,16 = 4417,13 \text{ [руб]}.$$

7.7.8 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 15.

Таблица 15 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	4747
2. Основная заработная плата	18887,61
3. Дополнительная заработная плата	2833,15
4. Отчисления во внебюджетные фонды	5886,33
5. Накладные расходы	4417,13
Бюджет затрат НТИ	36771,22

8 Социальная ответственность

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

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

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

Опасным производственным фактором, 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.

8.1 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 15.

Таблица 16 — 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 чистоты; освещённость; наличие излучения;

– психофизиологические.

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

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

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.

8.3 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 7.

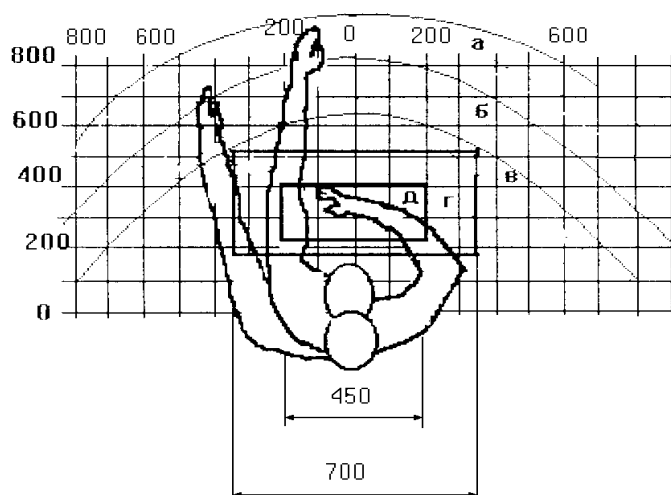


Рисунок 7 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

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.

8.4 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 и приведены в таблице 17.

Таблица 17 – 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

Продолжение таблицы 17

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. 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 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.

8.5 Электробезопасность

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

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

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;

- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

8.6 Пожарная и взрывная безопасность

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

Возможные причины загорания:

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

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

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

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

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

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

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых 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

В результате проделанной работы был произведён нейтронно-физический расчёт реактора, а именно: расчёт холодного реактора, расчёт горячего реактора, многогрупповой расчёт; были выбраны оптимальные параметры элементов конструкции реактора. Так же был проведён предварительный расчёт реактора, подсчитано значение $k_{эфф}$ реактора в «холодном» и «горячем» состояниях, которые равны 1,646 и 1,578 соответственно.

Присутствие отрицательного температурного эффекта и коэффициента реактивности означает, что реактор предполагает устойчивый режим работы.

В ходе проведения нейтронно-физического расчёта реактора так же были изучены методы нахождения ядерных концентраций, микросечений и макросечений взаимодействия, коэффициентов формулы четырёх сомножителей.

Был произведён расчёт реактора при помощи системы 26-групповых констант, на основе которых рассчитаны спектры интегральных потоков и ценностей нейтронов в активной зоне.

Так же был разработан программный модуль, который, используя актуальную базу данных, способен определять нуклидный состав топлива в любой момент времени.

Список использованных источников

- 1 Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 137 с.
- 2 Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов. Под редакцией Г.А. Батя – М.: Энергоиздат, 1982.
- 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 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.

Приложение А

Приложение Б

Приложение В

Приложение Г

Приложение Д

