

Школа Инженерная школа ядерных технологийНаправление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологииООП/ОПОП Ядерная физика и технологииОтделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Тема работы
Численная спектрометрия нейтронного излучения топлива ВВЭР

УДК 621.039.524.441:621.039.512

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A93	Веретенников Дмитрий Геннадьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Беденко Сергей Владимирович	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОЯТЦ	Селиваникова Ольга Валерьевна	—		

ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
Универсальные	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
Общепрофессиональные	
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
Профессиональные	
ПК(У)-1	Способен использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы
ПК(У)-2	Способен проводить математическое моделирование процессов и объектов атомной отрасли с использованием стандартных методов и компьютерных кодов для проектирования и анализа
ПК(У)-3	Готов к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу полученных экспериментальных данных
ПК(У)-4	Способен использовать технические средства для измерения основных параметров объектов исследования
ПК(У)-5	Готов к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок
ПК(У)-6	Способен использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу исходных данных для проектирования объектов атомной отрасли
ПК(У)-7	Способен к расчету и проектированию деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием
ПК(У)-8	Готов к разработке проектной и рабочей технической документации, оформлению законченных проектно-конструкторских работ
ПК(У)-9	Способен к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам
ПК(У)-10	Готов к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных решений при разработке установок и приборов
ПК(У)-11	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования
ПК(У)-12	Готов к эксплуатации современного физического оборудования, приборов и технологий
ПК(У)-13	Способен 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
ПК(У)-14	Готов разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, сверхвысокочастотных и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем
ПК(У)-15	Способен к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (ООП/ОПОП) 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП/ОПОП

_____ Селиваникова О.В.
 (Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
0A93	Веретенников Дмитрий Геннадьевич

Тема работы:

Численная спектрометрия нейтронного излучения топлива ВВЭР	
<i>Утверждена приказом директора (дата, номер)</i>	<i>31.01.2023 № 31-8/с</i>

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Тепловыделяющая сборка ВВЭР-1200 с штатным и модифицированным топливом. Штатное топливо: – UO_2 с обогащением 4,89 % по U^{235} ; – UO_2 с обогащением 4,85 % по U^{235} . Модифицированное топливо: – $\text{UO}_2 + 0,2 \text{ ат.}\% \text{ AmO}_2$, обогащение 4,9 % по U^{235} . Кампания реактора составляет 1468 суток.
Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке	Проведение литературного обзора по теме исследования, определение оптимального состава модифицированного топлива, нейтронно-физический расчёт и расчёт выгорания топлива, анализ источников альфа- и нейтронного излучения топлива, расчёт выходов нейтронов и их энергетических спектров, расчёт радиационных характеристик нейтронного излучения топлива, анализ полученных результатов.

Перечень графического материала	Презентация к защите выпускной квалификационной работе, блок-схема программы.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна
Социальная ответственность	Передерин Юрий Владимирович

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

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Беденко Сергей Владимирович	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A93	Веретенников Дмитрий Геннадьевич		

**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Обучающемуся:

Группа	ФИО
0A93	Веретенникову Дмитрию Геннадьевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/ООП/ОПОП	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	Бюджет проекта – не более 210000 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 160000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4 баллов из 5
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Размер отчислений во внебюджетные фонды – 30 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение потенциального потребителя результатов исследования. Оценочная карта конкурентных решений. SWOT-анализ проекта
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета проекта
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Нахождение интегральных показателей эффективности различных вариантов исполнения для определения сравнительной эффективности проекта

Перечень графического материала:

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 к разделу в соответствии с календарным учебным графиком	
---	--

Задание выдал консультант по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Спицына Л.Ю.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A93	Веретенников Дмитрий Геннадьевич		

ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Обучающемуся:

Группа	ФИО
0А93	Веретенникову Дмитрию Геннадьевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/ООП/ОПОП	14.03.02 Ядерные физика и технологии / Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения

Объект исследования: модель тепловыделяющей сборки ВВЭР-1200 с штатным и модифицированным топливом. Область применения: ядерная энергетика.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:

- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;
- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

- Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018);
- СанПиН 2.6.1.2523-09;
- ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ; ГОСТ 21889-76;
- ГОСТ 22269-76; ГОСТ Р 50923-96;
- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

2. Производственная безопасность:

2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов

2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия

- отклонение показателей микроклимата;
- превышение уровня шума;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- опасность поражения электрическим током.

3. Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях:

- возможные чрезвычайные ситуации при разработке и эксплуатации проектируемого решения: пожар, взрыв, природные катаклизмы;
- наиболее типичная чрезвычайная ситуация: пожар

Дата выдачи задания к разделу в соответствии с календарным учебным графиком

Задание выдал консультант по разделу «Социальная ответственность»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А93	Веретенников Дмитрий Геннадьевич		



Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (ООП/ОПОП) 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Уровень образования Бакалавриат

Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

Период выполнения Весенний семестр 2022/2023 учебного года

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Обучающийся:

Группа	ФИО
0A93	Веретенников Дмитрий Геннадьевич

Тема работы:

Численная спектрометрия нейтронного излучения топлива ВВЭР
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.02.2023	1. Составление технического задания и выбор направления исследований	10
15.02.2023	2. Разработка общей методики проведения исследований	10
15.03.2023	3. Подбор и изучение материалов по теме	10
14.04.2023	4. Проведение необходимых экспериментальных исследований и проверка полученных результатов	30
27.04.2023	5. Обработка полученных данных	20
17.05.2023	6. Оформление выполненной работы	10
22.05.2023	7. Подготовка к защите	10

СОСТАВИЛ:**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Беденко С.В.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:**Руководитель ООП/ОПОП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОЯТЦ	Селиваникова О.В.	—		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A93	Веретенников Дмитрий Геннадьевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит: 118 страниц, 26 рисунков, 59 таблиц, 63 источника, 6 приложений, 1 схему.

Ключевые слова: ядерный реактор; нейтронно-физический расчёт; тепловыделяющая сборка; модифицированное топливо; выгорающий поглотитель; программа WIMS-D5B; программа SOURCES-4C; выдержка топлива; нейтронный спектр; мощность дозы.

Объект исследования: модель тепловыделяющей сборки ВВЭР-1200 с штатным и модифицированным топливом. Предмет исследования: нейтронно-физические и радиационные характеристики топлива.

Цель работы: определение нейтронно-физических и радиационных характеристик штатного и модифицированного топлива ВВЭР-1200 с повышенной глубиной выгорания.

В процессе исследования проводились расчёты нейтронно-физических и радиационных характеристик топлива с различным изотопным составом, произведен расчёт финансовой составляющей работы, описаны факторы, влиявшие на выполнение работы.

В результате исследования выявлен оптимальный состав модифицированного топлива, рассчитаны нейтронно-физические характеристики и проведён расчёт выгорания топлива, проанализированы источники альфа- и нейтронного излучения топлива, рассчитаны выходы нейтронов и их энергетические спектры, рассчитаны радиационные характеристики нейтронного излучения топлива, оценена финансовая составляющая работа и описаны внешние факторы, оказывающие влияние на исследование.

Область применения: ядерная энергетика.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

Определения, обозначения, сокращения

В данной работе используются следующие термины:

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.

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

Выгорающий поглотитель: неподвижный поглотитель нейтронов, который расходуется в процессе эксплуатации реактора и выгружается из активной зоны вместе с топливом в процессе перегрузки.

Поглощённая доза: величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу, выражаемая как отношение энергии излучения, поглощённой в данном объёме, к массе вещества в этом объёме.

Эквивалентная доза: произведение поглощенной дозы на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма.

Используемые в работе обозначения и сокращения:

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

ЯТЦ – ядерный топливный цикл;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

АЭС – атомная электростанция;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ТВЭГ – тепловыделяющий элемент с гадолинием;

ОЯТ – отработавшее ядерное топливо;

СД – спонтанное деление.

Содержание

Введение.....	13
1 Обзор литературных источников	15
1.1 Ядерное топливо ВВЭР	15
1.2 Модифицированное топливо ВВЭР	18
1.2.1 Топливо без выгорающего поглотителя	18
1.2.2 Топливо с выгорающим поглотителем	20
1.2.2.1 Топливо с гадолинием	20
1.2.2.2 Топливо с эрбием	21
1.2.2.3 Топливо с америцием	22
2 Материалы и методы	23
2.1 WIMS-D5B	23
2.1.1 Расчётная модель ТВС.....	24
2.2 SOURCES-4C.....	27
2.2.1 Вывод спектров в модели с пучком	29
2.2.2 Вывод спектров в гомогенной модели.....	30
2.3 MATLAB	31
3 Результаты и обсуждение.....	32
3.1 Сравнительный анализ легирующих добавок.....	32
3.2 Нейтронно-физический расчёт ТВС	35
3.2.1 Изотопные составы топлива	35
3.2.2 Анализ результатов нейтронно-физического расчёта.....	36
3.3 Спектры нейтронного излучения топлива.....	38
3.3.1 Топливо с изотопным составом № 1	38
3.3.2 Топливо с изотопным составом № 2	42
3.3.3 Топливо с изотопным составом № 3	46
3.3.4 Сравнительный анализ полученных результатов.....	49
3.4 Расчёт мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения.....	51
3.4.1 Построение нейтронных спектров по формуле Уатта	55

3.4.2	Аппроксимация нейтронных спектров	57
3.4.3	Сравнение результатов расчёта мощности дозы	59
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	62
4.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	62
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	62
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений.	64
4.1.3	SWOT-анализ.....	66
4.2	Планирование научно-исследовательских работ.....	68
4.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	68
4.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ	69
4.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	70
4.3	Бюджет проекта	74
4.3.1	Материальные затраты	74
4.3.2	Затраты на специальное оборудование.....	75
4.3.3	Основная заработная плата	76
4.3.4	Дополнительная заработная плата	77
4.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды	78
4.3.6	Контрагентские расходы	79
4.3.7	Накладные расходы	79
4.3.8	Формирование бюджета затрат проекта	80
4.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	81
5	Социальная ответственность	84
5.1	Производственная безопасность	84
5.2	Микроклимат	85
5.3	Шум	87
5.4	Освещенность	88
5.5	Электромагнитные поля	91

5.6 Электробезопасность	92
5.7 Пожаровзрывобезопасность.....	93
5.8 Радиационная безопасность	95
5.9 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях.....	96
5.10 Выводы по разделу.....	97
Заключение	99
Список публикаций студента.....	101
Список используемых источников.....	102
Приложение А Фрагмент листинга входного файла WIMS-D5B	109
Приложение Б Фрагмент листинга входного файла SOURCES-4C	110
Приложение В (формат А3) Блок-схема программы	111
Приложение Г Спектры целевых для (α , n)-реакции элементов.....	112
Приложение Д Изменение нуклидного состава топлива	115
Приложение Е Коэффициенты аппроксимирующих полиномов	117

Введение

В реакторах типа ВВЭР в качестве топлива используется UO_2 с обогащением по U^{235} от 3 до 5 %. Основным недостатком UO_2 является сравнительно низкая теплопроводность, которая ограничивает производительность и безопасность реактора.

Практическое применение получило модифицированное топливо $\text{UO}_2 + 5\text{-}8 \text{ масс.}\% \text{ Gd}_2\text{O}_3$. Проводятся исследования свойств активной зоны, содержащей топливо с AmO_2 в качестве выгорающего поглотителя [1]. Для длительной и эффективной работы реактора топливо легируют различными гомогенными соединениями и гетерогенными включениями.

В качестве легирующих добавок также рассматриваются В, Ве, В, С, Mg, Al, Si, Hf, Er, Pa и др. Эти элементы улучшают радиационную и термическую стойкость топлива, его теплопроводность, теплофизические и нейтронно-физические параметры активной зоны. Например, при добавлении в топливо Ве улучшается его теплопроводность [2]. При введении микродобавок, содержащих Al и Si, увеличиваются размеры зерна плотноспечённого UO_2 и тем самым повышается механическая прочность топливной композиции [3, 4].

Очевидно, что перечисленные элементы обладают рядом преимуществ при их использовании в качестве легирующих добавок, однако некоторые из них являются целевыми для (α, n) -реакции и поэтому могут существенно осложнить радиационную обстановку на стадиях открытого и закрытого ЯТЦ.

Данный факт подтверждается предварительными расчётами, проведенными в рамках данной работы с помощью программы SOURCES-4C. Графики полученных нейтронных спектров легирующих добавок легких элементов для топлива реактора типа ВВЭР представлены на рисунке 1 в сопоставлении с экспериментальными значениями, полученными при бомбардировке легких элементов альфа-частицами в рамках работы [5]. Для сравнения также представлен нейтронный спектр кислорода, входящего в состав UO_2 .

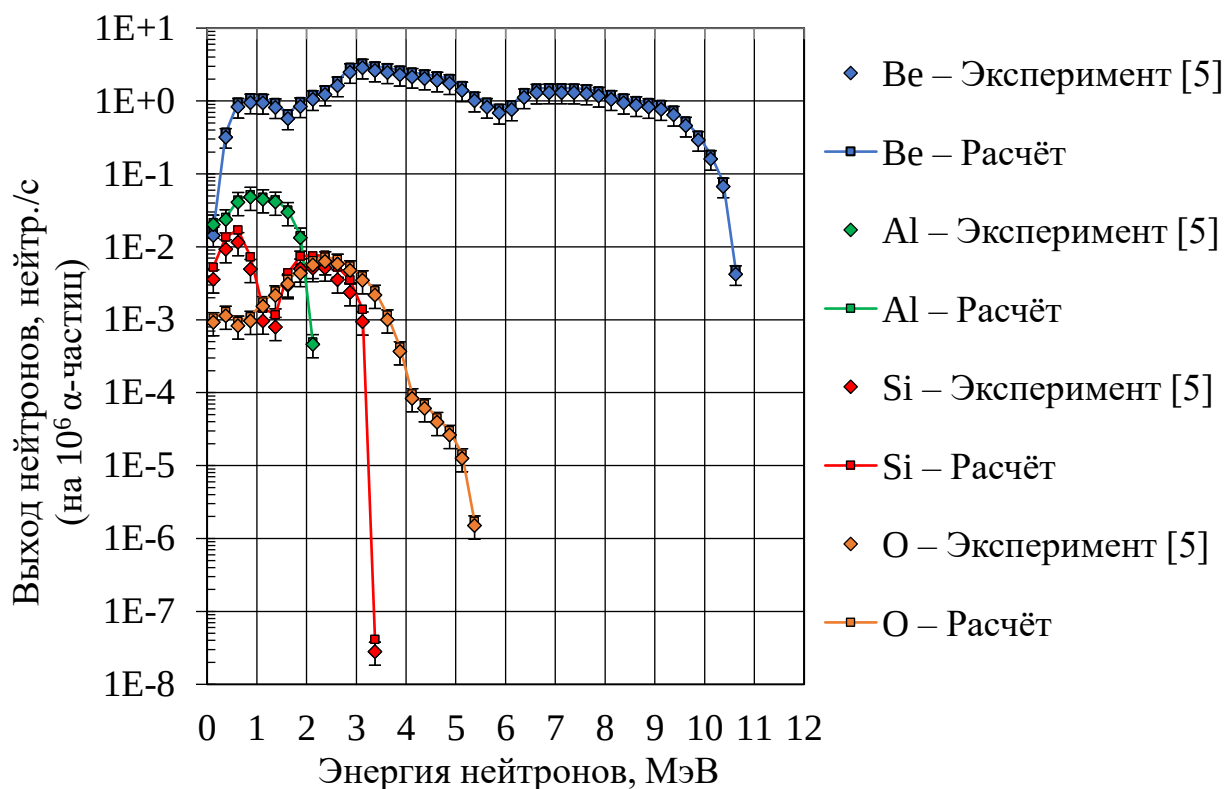


Рисунок 1 – Нейтронные спектры целевых для (α, n)-реакции элементов

Кроме того, используемое на практике топливо с Gd_2O_3 имеет сниженное на 20 % значение теплопроводности [3], поэтому ведутся поиски альтернативных выгорающих поглотителей.

Объектом исследования является модель ТВС ВВЭР-1200 с штатным и модифицированным топливом. Предметом же являются нейтронно-физические и радиационные характеристики топлива.

Цель данной работы: определение нейтронно-физических и радиационных характеристик штатного и модифицированного топлива ВВЭР-1200 с повышенной глубиной выгорания.

Для достижения цели работы поставлен ряд задач:

- нейтронно-физический расчёт ТВС и расчёт выгорания топлива;
- анализ источников альфа- и нейтронного излучения топлива;
- расчёт выходов нейтронов и их энергетических спектров;
- расчёт радиационных характеристик нейтронного излучения топлива.

1 Обзор литературных источников

1.1 Ядерное топливо ВВЭР

Главным отличием атомной электростанции от традиционной является получение энергии в результате цепной реакции деления. Из-за ее высокого энергетического эквивалента и потенциальной опасности выбор топлива для реактора определяется как свойствами безопасности станции, так и ее технико-экономическими характеристиками [6, 7].

При выборе типа топлива и способа его размещения в ядерном реакторе необходимо учитывать сразу несколько, порой взаимно противоречивых требований, таких, как:

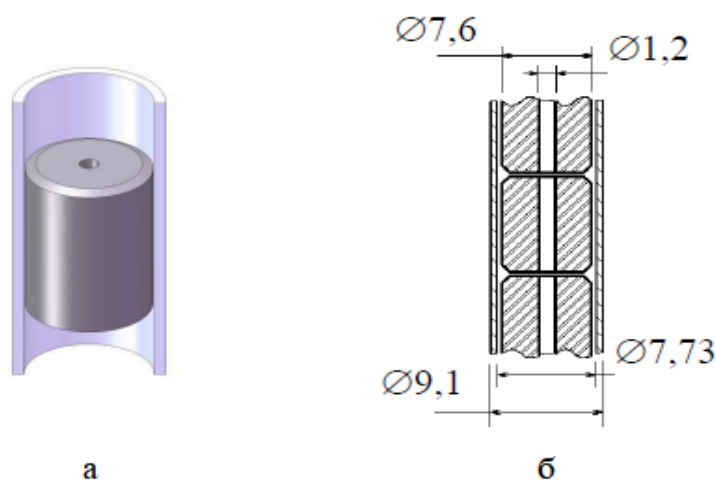
- создание и поддержание в течение длительного времени критической массы топлива для цепной реакции деления;
- технологичность перегрузки топлива;
- обеспечение интенсивного теплосъема с топлива;
- удержание радиоактивных продуктов деления внутри топлива;
- экономичность и др [8, 9, 10].

Эти требования должны выполняться не только при нормальной эксплуатации, но и в аварийных ситуациях, что подчас более важно для надежного обеспечения безопасности [7].

Инженерам и технологам известны многочисленные химические соединения урана и плутония, такие, как металлические U и Pu, диоксиды U_3O_8 , UO_2 , PuO_2 , фториды и хлориды UCl_3 , UCl_4 , $PuCl_3$, UF_3 , UF_4 , UF_6 , а также нитриды, карбиды, уранил-нитраты и многие другие [11, 12, 13]. Как видно, выбор материалов достаточно велик. Все они имеют разные физико-химические и технологические свойства, у каждого из них имеются свои преимущества и недостатки. Большинство из этих материалов уже исследовались с точки зрения их использования в качестве потенциального топлива для реакторов различного назначения [14].

Компромисс по выполнению указанных требований к топливу и реальных возможностей имеющихся материалов привел к тому, что в качестве ядерного топлива для энергетических реакторов был выбран именно диоксид урана UO_2 [15].

Само ядерное топливо в реакторе размещено в виде достаточно сложных конструкций тепловыделяющего элемента и тепловыделяющей сборки [16]. Общий вид топливной таблетки твэла и её схема с указанием размеров представлены на рисунке 1.1.



а – общий вид; б – схема с указанием размеров
Рисунок 1.1 – Топливная таблетка твэла ВВЭР [17]

Таблетки диоксида урана выпускаются с различным обогащением урана по изотопу урана-235. Для ВВЭР стандартные обогащения топлива, следующие: 3,0 – 3,6 – 4,0 – 4,4 – 5 % [14].

Двуокись урана имеет температуру плавления около 2800...2900 °С, она не взаимодействует с водой и паром даже при высоких температурах, совместима с материалом оболочки твэла. Диоксид урана – керамический материал, поэтому он имеет очень низкую теплопроводность, сравнимую с огнеупорными материалами. Плотность диоксида урана варьирует в пределах от 9,4 до 10,8 г/см³, зависит от технологии уплотнения и спекания. В топливе реакторов ВВЭР диоксид обычно имеет плотность 10,4...10,7 г/см³ [14, 18].

Матрица диоксида урана является достаточно жесткой и позволяет удерживать 95...98 % радиоактивных продуктов деления, которых к концу

кампании топлива накапливается примерно 600 Ки на килограмм топлива. Таким образом, сама матрица топлива является первым физическим барьером, препятствующим выходу радиоактивных продуктов [12, 14].

При протекании цепной реакции деления урана на мощности по объему топливной таблетки равномерно выделяется тепловая энергия с интенсивностью до 450 кВт/л. Эта энергия передается из объема таблетки к поверхности твэла теплопроводностью, поэтому максимальная температура будет в центре таблеток. При номинальной мощности реактора средняя температура в центре топливных таблеток равна около 1500...1600 °С, а на поверхности этих таблеток – около 470 °С, что обеспечивает очень большой перепад температур – порядка 1200 °С – при радиусе твэла всего 3,8 мм. Максимальная температура в центре таблетки UO_2 и на ее поверхности достигает 1940 и 900 °С соответственно [14, 19].

Однако наибольшие изменения происходят с топливом по мере его выгорания. Содержание делящегося урана-235 в массе топливных таблеток (в равновесном топливном цикле) снижается от 4,4 % в начале работы до примерно 0,6...0,8% перед выгрузкой из реактора через 3...4 года работы. При этом сама таблетка распухает, деформируется и растрескивается, причем растрескивание может быть как радиальным, так и кольцевым. Любой тип растрескивания топлива снижает теплопроводность, но особенно заметно это происходит при кольцевых трещинах. При распухании топливо может вступать в прямой контакт с оболочкой, что также нежелательно. Изменяется и температура плавления топлива [14, 15, 16].

В последнее время непрерывно ведутся разработка и опытная эксплуатация усовершенствованного топлива. Цели всех усовершенствований заключаются в том, чтобы повысить глубину выгорания топлива, сохранив плотность и герметичность твэла, а также в определенных пределах геометрию твэла и ТВС [10, 12].

В усовершенствованном топливе диаметры центрального отверстия были уменьшены с 2,4 до 1,5 мм (а в некоторых до 1,2 мм с тенденцией

дальнейшего уменьшения до нуля), что позволяет увеличить топливную загрузку реактора, хотя при этом несколько повышается температура в центре таблетки. Для этой же цели, а также для снижения утечки нейтронов в торцевом направлении пока только в экспериментальном топливе в торцы твэла добавляют таблетки обедненного урана, что позволяет увеличить топливную загрузку ТВС на 21 кг урана и довести её до 515,4 кг [10, 14].

В последние годы после ряда исследований обогащение топлива подпитки было повышено до 5 %. Такое топливо уже работает на блоках ВВЭР. По имеющимся данным, после реакторных исследований в твэлах, достигших глубины выгорания примерно 50...55 МВт·сут/кг(U), оксидная пленка на оболочке не превышает безопасных пределов, выделение газообразных продуктов деления составляет порядка 3 %. Таким образом, условия работы оболочки даже при таких выгораниях топлива являются удовлетворительными. То есть твэлы имеют существенные резервы, чтобы достичь планируемых глубин выгорания порядка 60...65 МВт·сут/кг(U) [14].

1.2 Модифицированное топливо ВВЭР

Существует задача увеличения эффективности использования топлива в ВВЭР путём повышения глубины выгорания топлива вплоть до 70 – 100 МВт·сут/кг(U) [3, 4]. Таких высоких значений предполагается достичь путем применения модифицированного оксидного ядерного топлива. Данной задаче посвящено множество исследований, среди которых рассматриваются варианты как с использованием выгорающих поглотителей, так и с добавками других элементов.

1.2.1 Топливо без выгорающего поглотителя

При использовании UO_2 с 10% мольными долями окиси бериллия (BeO) происходит улучшение теплопроводности, как следствие – меньше проблем с перегревом, но при этом требуется увеличение ураноёмкости сердечника [2].

Введение микродобавок (менее 0,25% по массе) $\text{Al}(\text{OH})_3$, SiO_2 , Al_2O_3 позволяет увеличить размер зерен диоксида урана до 25 мкм и более. Тем самым повышается механическая прочность таблеток по сравнению с нелегированным материалом при одновременном улучшении распределения пор по размерам и небольшом повышении теплопроводности [3].

Установлено, что введение легирующих элементов алюминия и кремния снижает температуропроводность диоксида урана во всем интервале температуры. Термическое расширение легированных и чистых образцов отличается не более чем на 10 %. Добавки, стимулирующие рост зерна, не оказывают заметного влияния на теплопроводность диоксида урана [3, 4].

Малая легирующая добавка $\text{Al}(\text{OH})_3$, составляющая 0,02 % по массе уменьшает температуру спекания таблетки на 45 °С, увеличивает размер зерна и, соответственно, повышает механическую прочность таблеток примерно в 1,2–1,5 раз выше стандартных. Кроме того, увеличение размера зерна уменьшает разветвленность границ и снижает скорость миграции газонаполненных пор к границам зерен, являющихся путями ускоренной диффузии [4].

Введение легирующих добавок $\text{Al}(\text{OH})_3$ в количестве 0,05–1,00 % по массе практически не влияет на процесс уплотнения. Линейные размеры и плотность неспеченных таблеток практически не меняются. Данные добавки также не оказывают практически никакого влияния на размеры и плотность спеченных изделий [20].

При легировании топлива 0,15–0,25 масс.% $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ улучшаются свойства таблетки в плане удержания важнейших продуктов деления, среди которых Cs, Ba, Sr и другие. Они остаются в топливе ввиду образования стабильных алюмосиликатов, таких как $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$ [21].

Тем не менее, в большинстве исследований отмечается, что хоть легирующие добавки и имеют большой вес в деле улучшения характеристик топливных таблеток, свойства такого топлива пока что не изучены достаточно полно.

1.2.2 Топливо с выгорающим поглотителем

В реакторах типа ВВЭР в настоящее время применяются частичные перегрузки топлива с удлиненными кампаниями с длительностью в 1,5 года, а в дальнейшем возможен переход и на 2-х годовичные кампании [14]. Обеспечение таких кампаний требует увеличения обогащения топлива, что влечет за собой повышения начального запаса реактивности топливной загрузки, которое должно быть скомпенсировано действующей системой компенсации избыточной реактивности. Эта система включает в себя как жидкостную систему, основанную на растворении в теплоносителе борного поглотителя, так и систему выгорающих поглотителей, интегрированных в топливную матрицу [9, 22].

Использование жидкостной системы при большом запасе реактивности оказывает негативное влияние на величину и знак плотностного коэффициента реактивности и к большому объему низко-активных жидких радиоактивных отходов на АЭС. Дальнейшее обращение с жидкими радиоактивными отходами может повлечь дополнительные финансовые вложения. Именно применение выгорающих поглотителей, интегрированных в топливо, может существенно снизить эти негативные последствия увеличения длительности кампании [23, 24].

В реакторах типа ВВЭР наибольшее применение в качестве топливной добавки нашел сильный выгорающий поглотитель – гадолиний. Помимо этого, ведутся исследования, целью которых является изучение свойств и поведения в топливе альтернативных и, по некоторым параметрам, более эффективных по сравнению с гадолинием выгорающих поглотителей. Среди них чаще всего обращают внимание на эрбий и америций, которые также предлагают размещать в топливе в виде оксидов.

1.2.2.1 Топливо с гадолинием

В составе природного гадолиния содержится два сильных поглотителя тепловых нейтронов Gd-155 и Gd-157. Они имеют аномальное сечение

поглощения тепловых нейтронов: 60 тыс. барн у Gd-155 и 253 тыс. барн у Gd-157. Природный гадолиний благодаря данным изотопам также обладает высоким сечением захвата тепловых нейтронов – порядка 49 тыс. барн [24].

В твэгах современных ТВС реактора ВВЭР гадолиний размещается в виде оксида (Gd_2O_3), концентрация варьируется в пределах 5-8 % весовых. Высокое сечение поглощения приводит к тому, что гадолиний успевает выгореть в течении первой кампании. По этой причине он не влияет на среднее выгорание выгружаемого топлива. Стоит отметить, что с увеличением весового содержания гадолиния в топливе уменьшается теплопроводность твэга в результате чего появляется растрескивание и выход продуктов деления из топлива [24, 25].

1.2.2.2 Топливо с эрбием

В России на реакторах РБМК применяется более слабый поглотитель нейтронов – эрбий. Поскольку это слабый поглотитель, то его размещают либо во всех твэлах, либо в большей части твэлов без изменения обогащения урана и в этом случае он не будет оказывать влияния на неравномерность энерговыделения в ТВС. В отличие от гадолиния, эрбий не успевает полностью выгореть за одну кампанию, поэтому остаточное содержание поглотителя в отработавшем топливе приводит к снижению выгорания выгружаемого топлива. Выгорание выгружаемого топлива будет зависеть от весового содержания эрбия. Кроме того, наличие эрбия в топливной матрице не ухудшает теплопроводность [24, 26, 27].

При использовании Er_2O_3 в качестве выгорающего поглотителя нескомпенсированный запас реактивности уменьшается с ростом весового содержания эрбия в твэлах и минимальное значение достигает величины 30 % от полного запаса реактивности при весовом содержании эрбия 1,1 %, но при этом потеря в выгорании составляет около 20 % [24, 28].

Для чисто эрбиевого поглотителя такой же результат как в случае с гадолинием достигается при увеличении весового содержания эрбия во всех

ТВЭлах, но при этом существенно понижается выгорание выгружаемого топлива. Однако, снижение выгорания топлива сопровождается уменьшением коэффициента неравномерности энерговыделения в активной зоне. Применяя перестановки при перегрузках ТВС определенного типа можно частично скомпенсировать проигрыш в выгорании, например, увеличивая долю свежих ТВС, загружаемых в центральную часть активной зоны [24].

1.2.2.3 Топливо с америцием

Существует множество других изотопов с высоким значением сечения поглощения тепловых нейтронов, таких как европий, диспрозий, кадмий, самарий, палладий и некоторые младшие актиноиды [29, 30]. Среди младших актиноидов америций-241, $\text{Am}^{242\text{m}}$, кюрий-243 и Cm^{245} имеют большое сечение поглощения нейтронов. Сечение деления на тепловых нейтронах для $\text{Am}^{242\text{m}}$, Cm^{243} и Cm^{245} также велико, поэтому использовать их в качестве выгорающих поглотителей нецелесообразно. Тем не менее, Am^{241} не имеет данной проблемы, а его сечение поглощения равно 699,2 б, что составляет большую величину, чем 645,5 б у Er^{167} . Поэтому Am^{241} может быть использован в качестве выгорающего поглотителя [1, 31].

В работе, посвященной использованию америция-241 в качестве выгорающего поглотителя, используется америций, полученный из отработавшего ядерного топлива. Сделан вывод о возможности использования AmO_2 вместо Gd_2O_3 для уменьшения излишней реактивности ТВС в реакторах типа ВВЭР, причем следует придерживаться содержания AmO_2 от 0,2 до 0,25 % в ТВэле с UO_2 . Гомогенная смесь 0,2 % AmO_2 с UO_2 показывает наилучшие результаты [1].

При анализе отработавшего ядерного топлива с америцием выяснено, что в ходе работы реактора 55 % изначально имеющихся изотопов Ам преобразуются в изотопы Рц, 18 % – в изотопы См и лишь 5 % остаются в ОЯТ. Следовательно, 22 % изначально имеющихся изотопов Ам выгорают эффективно и вносят вклад в производство энергии [1].

2 Материалы и методы

2.1 WIMS-D5B

Программа WIMS-D5B позволяет проводить нейтронно-физический расчет ячеек реакторов различных типов. Особенностью программы является возможность учета выгорания топлива в процессе кампании.

Программа использует универсальную 69-групповую библиотеку констант, подготовленную на основе файлов оцененных нейтронных данных и содержащую в себе 90 нуклидов. Спектр деления соответствует 27 группам с максимумом на 4 группе. Интервал резонансных энергий включает 13 групп. Тепловая область энергий содержит 30 групп [32].

Программа может решать задачи в плоской, цилиндрической и сферической одномерных геометриях и в двумерной rz -геометрии.

Расчет задачи о пространственно-энергетическом распределении плотности потока нейтронов производится в два этапа. На первом этапе реальная исходная ячейка преобразуется в упрощенную, эквивалентную по площади реальной. Далее расчет пространственно-энергетического распределения нейтронов в такой ячейке происходит следующим образом:

- рассчитывается детальный спектр в 69 группах в каждой из зон, типичной для ячейки: в топливе, оболочке, теплоносителе и замедлителе;
- осуществляется свертка сечений к заданному малогрупповому приближению, в котором рассчитываются детальные пространственные распределения нейтронов по ячейке;
- проводится модификация полученного решения с учетом утечки;
- малогрупповые потоки разворачиваются в 69-групповое представление и рассчитываются скорости реакций для заданных изотопов.

В программе WIMS реализованы метод вероятности первых столкновений для решения уравнения переноса нейтронов в интегральной форме и метод дискретных ординат, который может применяться только в случае бесконечных цилиндров и пластин [32].

2.1.1 Расчётная модель ТВС

В рамках данной работы рассматривается используемый на ВВЭР-1200 вариант ТВС без твэгов. Геометрия такой ТВС в виде ячеек представлена на рисунке 2.1. Внутренние ячейки и сама ТВС имеют в сечении форму правильного шестиугольника.

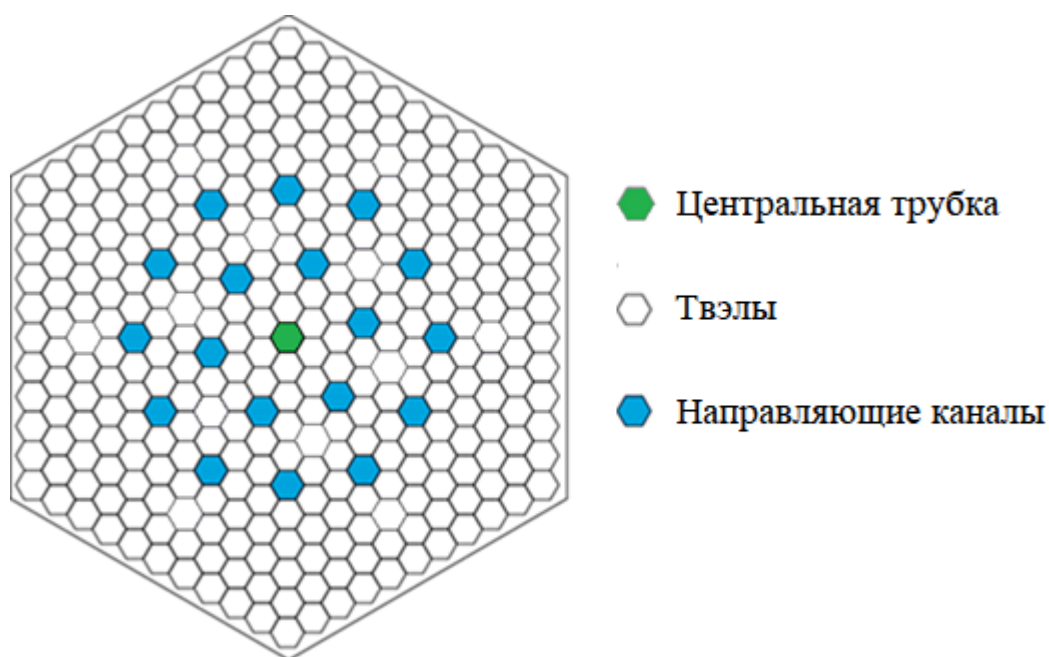
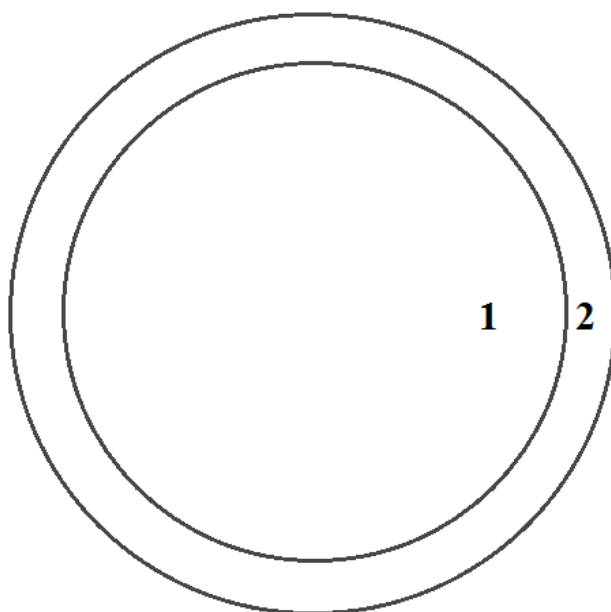


Рисунок 2.1 – Геометрия варианта ТВС без твэгов на ВВЭР-1200

В качестве расчётной модели в программе WIMS-D5B используется ТВС с упрощенной геометрией, представленная на рисунке 2.2 (внутренние элементарные ячейки не указаны, но подразумеваются). В таком случае ячейки, содержащие твэлы, направляющие каналы, центральную трубку, а также сама ТВС имеют в сечении форму круга, так как реальная шестигранная ячейка заменяется на эквивалентную цилиндрическую, у которой площадь поперечного сечения равна площади реальной ячейки. Такое упрощение позволяет использовать для расчёта радиусы компонентов ТВС.

Рассматриваемая модель имеет параметры, приведенные в таблице 2.1, которые необходимо преобразовать с учетом упрощения формы до цилиндрической. Данные параметры были использованы авторами работы [1].



1 – замедлитель-теплоноситель с внутренними ячейками; 2 – оболочка ТВС
Рисунок 2.2 – Расчётная модель в WIMS-D5B

Таблица 2.1 – Параметры ТВС ВВЭР-1200 [1]

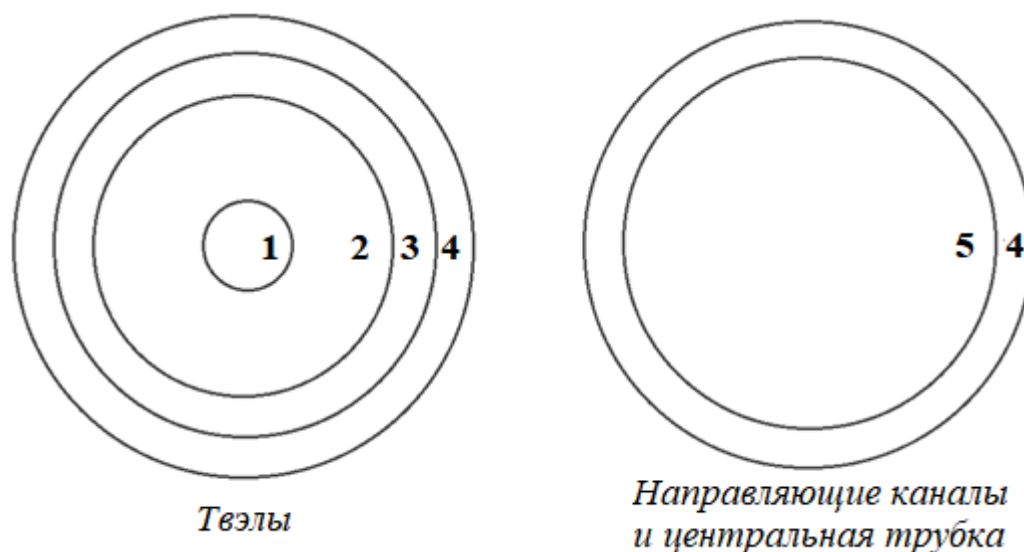
Параметр	Значение	Единица измерения
Количество центральных трубок	1	
Количество направляющих каналов	18	
Количество твэлов	312	
Радиус отверстия топливной таблетки	0,60	мм
Внешний радиус топливной таблетки	3,80	мм
Зазор между топливной таблеткой и оболочкой твэла	0,065	мм
Толщина оболочки твэла	0,685	мм
Внутренний радиус центральной трубки	3,865	мм
Внешний радиус центральной трубки	4,55	мм
Внутренний радиус направляющих каналов	3,865	мм
Внешний радиус направляющих каналов	4,55	мм
Шаг между твэлами	1,275	мм
Шаг между ТВС	236	мм
Температура топлива	873	К
Температура компонентов	573	К
Содержание бора в замедлителе	400	ppm
Глубина выгорания	60	МВт·сут/кг(U)
Массовая доля смеси изотопов урана в топливе	87,9	%
Масса урана в ТВС	534,1	кг
Высота топливного столба	3730	мм
Плотность топлива	10,5	г/см ³

Материалы, используемые в данной ТВС, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Материалы ТВС ВВЭР-1200 [33]

Элемент ТВС	Материал
Топливная таблетка	Спечённый диоксид урана
Оболочка ТВЭЛа	Сплав циркония Э 110
Оболочка направляющего канала	Сплав циркония Э 110
Оболочка центральной трубки	Сплав циркония Э 110
Замедлитель, теплоноситель	Лёгкая вода
Оболочка ТВС	Сплав циркония Э 110

Геометрия элементарных ячеек представлена на рисунке 2.3.



1 – отверстие; 2 – топливная таблетка; 3 – зазор; 4 – оболочка;
5 – замедлитель-теплоноситель

Рисунок 2.3 – Геометрия элементарных ячеек для расчёта в WIMS-D5B

Расчёт в WIMS-D5B проводится методом вероятности первых столкновений. Кампания реактора принимается равной 1468 суткам.

Далее в рамках данной работы рассматриваются три различных топливных состава, начальные концентрации изотопов задаются согласно данным авторов работы [1], причем третий состав представляет собой гомогенную смесь $\text{UO}_2 + \text{AmO}_2$. Все остальные условия, приближения и параметры ТВС остаются идентичными указанным выше во всех трёх случаях.

В качестве примера в приложении А указан фрагмент листинга входного файла, запускаемого WIMS-D5B для расчёта ТВС с топливом № 1.

2.2 SOURCES-4C

SOURCES-4C – это программа, с помощью которой можно определить интенсивность нейтронного излучения и спектры (α , n)-реакций, спонтанного деления, запаздывающих нейтронов. Программный код способен вычислять интенсивность излучения источника, используемого в (α , n)-реакции, и нейтронные спектры в четырех типах задач:

- задача с гомогенной средой (однородная смесь источника альфа-излучения и материала мишени с низким зарядовым числом Z);
- задача с двумя средами (пластина альфа-излучателя расположена вплотную с пластиной из материала с низким Z);
- задача с тремя средами (тонкая пластина из материала с низким Z расположена между альфа-излучателем и материалом мишени);
- задача с моноэнергетическим пучком альфа-частиц, падающим на пластину материала мишени.

В рамках данной работы используются возможности программы решать задачу с пучком и задачу с гомогенной средой.

Задача с гомогенной средой – это задача, в которой α -излучающий материал и источники спонтанного деления тесно перемешаны с материалом мишени с низким Z (т. е. атомы α -излучающего материала непосредственно примыкают к атомам мишени). В этой задаче рассматриваются три типа нейтронов: нейтроны спонтанного деления, запаздывающие нейтроны и нейтроны, испускаемые в результате (α , n)-реакций. Источник нейтронов представляет из себя количество нейтронов, производимых в секунду на единицу объема. Для всех однородных расчетов предполагаются близкие условия смеси и толстой мишени (т. е. размеры мишени намного меньше, чем пробег α -частиц), так что все α -частицы останавливаются внутри смеси. Спектры нейтронов (α , n)-реакции определяются в предположении изотропного углового распределения нейтронов в системе центра масс [34].

Задача с пучком – это задача, в которой моноэнергетический α -пучок падает на пластину, содержащую мишень с малым Z , как показано на рисунке 2.4. Хотя пластина может также содержать изотопы с более высокой массой (даже актиниды), любой α -излучающий или спонтанно делящийся материал не будет использоваться для расчета источника. Такие условия должны моделироваться отдельно. Необходимым условием является то, что толщина пластины материала мишени является достаточно большой, так что все α -частицы останавливаются внутри неё. [34].

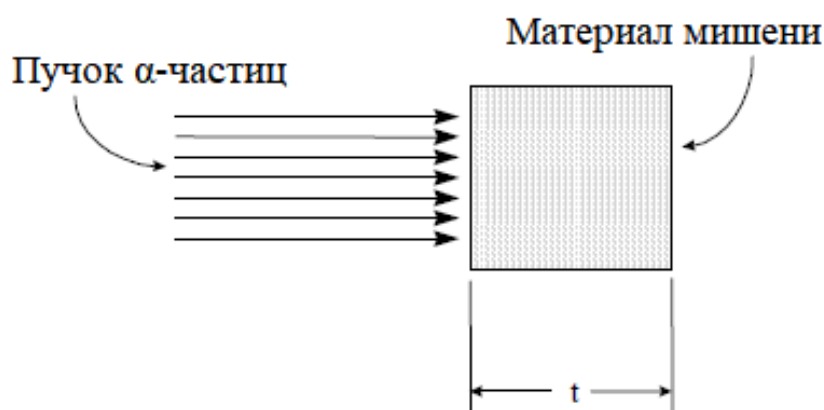


Рисунок 2.4 – Общая схема задачи о пучке [34]

Скорость образования нейтронов внутри пластины на одну падающую α -частицу является функцией энергии пучка α -частиц и вероятности протекания (α, n) -реакции с любым нуклидом внутри пластины и α -частицей из пучка до остановки в материале [34].

Входные данные для всех четырех типов задач задаются в виде файла `tar1`, который редактируется с помощью текстового редактора. Тем не менее, в случае задачи с гомогенной средой и задачи о пучке для ввода входных данных можно воспользоваться графическим пользовательским интерфейсом LASTCALL, который включен в пакет кода.

В зависимости от задачи, SOURCES-4C может создать от двух до шести выходных файлов. Каждый выходной файл имеет заголовок, обобщающий содержимое каждого файла, и строку с названием задачи.

2.2.1 Вывод спектров в модели с пучком

В целях сравнения спектров легирующих элементов лёгкой и средней массы диапазон рассматриваемых энергий нейтронов обозначен от 0 до 12 МэВ. Данный диапазон энергий разделен на 48 равнозначных моноэнергетических групп для представления спектра в групповом виде. Для расчёта использовалась задача с моноэнергетическим пучком альфа-частиц, падающим на материал мишени. Энергия альфа-частиц принималась равной 5 МэВ, так как она соответствует средневзвешенной энергии спектра α -частиц ОЯТ реактора ВВЭР-1200 с выгоранием 60 МВт·сут/кг(U), выдержкой от года и удельной активностью $2,58 \cdot 10^{15}$ Бк/ТВС.

Нормированный спектр нейтронов выводится в выходных файлах SOURCES-4C: outp2 и tare8. В них представлено распределение по энергиям нейтронов в МэВ выхода нейтронов в относительных единицах.

Для получения абсолютного спектра из нормированного, необходимо воспользоваться данными из выходного файла tare6. В нем представлен полный выход нейтронов, который имеет размерность нейтр./($\text{с} \cdot \text{мкА}$). Умножив на данный параметр все значения нормированного спектра, можно получить абсолютный спектр, в котором выход нейтронов будет также иметь размерность нейтр./($\text{с} \cdot \text{мкА}$).

Тем не менее, наиболее распространенной единицей измерения выхода нейтронов в результате (α , n)-реакций является следующая размерность: нейтр./($\text{с} \cdot 10^6 \alpha$ -частиц). В программе представлено постоянное значение: $3,1209 \cdot 10^{12}$ α -частиц/($\text{с} \cdot \text{мкА}$), которое показывает, какой должен быть моноэнергетический поток α -частиц с энергией 5 МэВ для создания тока 1 мкА. Соответственно, взяв обратную величину, можно узнать, какой ток будет создавать одна α -частица в секунду: $3,2042 \cdot 10^{-13}$.

Тогда в случае размерности выхода нейтронов нейтр./($\text{с} \cdot \text{мкА}$) необходимо знать отношение нейтронов к альфа-частицам и поделить его на 10^6 для перехода в размерность нейтр./($\text{с} \cdot 10^6 \alpha$ -частиц). Отношение нейтронов

к альфа-частицам можно узнать из выходного файла tareб. Таким образом рассчитывается полный выход нейтронов, а для получения абсолютного спектра необходимо данное значение умножить на значения нормированного спектра в относительных единицах.

2.2.2 Вывод спектров в гомогенной модели

В рамках данной работы рассматриваются нуклидные составы топлива на начало кампании, конец кампании и после выдержки в течение 1, 2, 3, 5 и 7 лет согласно данным авторов [1]. Чтобы вывести нейтронные спектры ядерного топлива, в SOURCES-4C реализована задача с гомогенной средой. В данном случае источниками альфа-излучения и нейтронов в результате спонтанного деления являются тяжелые изотопы, составляющие топливо. Материалом мишени являются O^{17} и O^{18} – изотопы, целевые для (α, n) -реакции.

Во всех случаях диапазон рассматриваемых энергий нейтронов обозначен от 0 до 12 МэВ. Данный диапазон энергий разделен на 48 равнозначных моноэнергетических групп.

Процесс формирования входного файла для расчёта в SOURCES-4C:

- сначала задаются атомные фракции элементов в топливе;
- далее задаются ядерные концентрации тяжелых изотопов;
- после этого задаются атомные фракции изотопов O^{17} и O^{18} в кислороде, которые в рамках данной работы приняты постоянными и равными во всех случаях 0,000253 и 0,001333 соответственно согласно [34].

В качестве примера в приложении Б указан код SOURCES-4C для расчёта нейтронного спектра топлива № 1 на конец кампании.

Значения выхода нейтронов, полученные с помощью SOURCES-4C, имеют размерность нейтр./ $(с \cdot см^3)$. Полученные результаты можно перевести в нейтр./ $(с \cdot т(U))$, умножив их на значение плотности UO_2 и на значения концентраций в г/т(U) для каждого изотопа соответственно.

В конечном итоге нейтронные спектры в рамках данной работы представлены с использованием значений выхода нейтронов с размерностью нейтр./($\text{с} \cdot \text{TBC}$), что позволяет учитывать массу урана в TBC.

Значения интенсивности альфа-излучения с размерностью α -частиц/($\text{с} \cdot \text{см}^3$) переводятся в размерность α -частиц/($\text{с} \cdot \text{TBC}$) аналогичным образом.

2.3 MATLAB

MATLAB – это пакет прикладных программ, предназначенный для решения широкого спектра инженерных и научных задач любой сложности в любых отраслях.

Язык MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования.

Программы, написанные на MATLAB, бывают двух типов – функции и скрипты. Функции имеют входные и выходные аргументы, а также собственное рабочее пространство для хранения промежуточных результатов вычислений и переменных. Скрипты же используют общее рабочее пространство. Как скрипты, так и функции сохраняются в виде текстовых файлов и компилируются в машинный код динамически [35].

В рамках данной работы в MATLAB реализован программный код, осуществляющий автоматический вывод необходимых данных в удобном виде для дальнейшей обработки в табличном процессоре Microsoft Excel.

Блок-схема программы для вывода данных из выходных файлов SOURCES-4C представлена в приложении В.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Сравнительный анализ легирующих добавок

Нейтронные спектры всех рассмотренных лёгких элементов, являющихся целевыми для (α, n) -реакции, в целях сравнительного анализа представлены на рисунке 3.1 в групповом виде и полулогарифмической шкале.

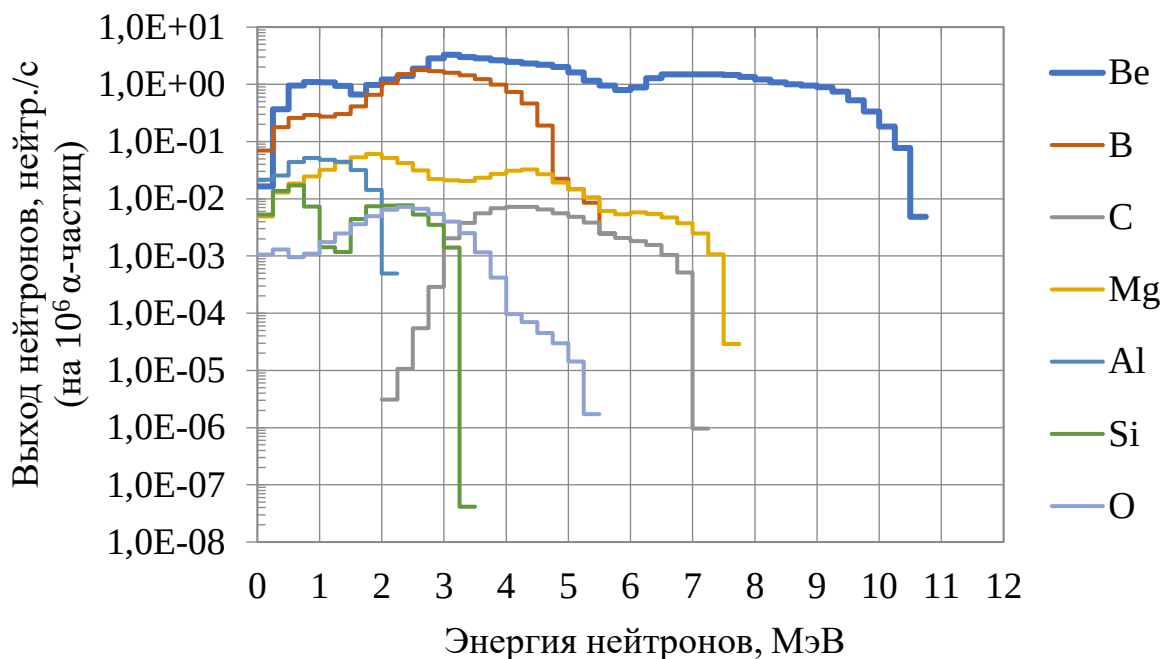


Рисунок 3.1 – Спектры рассмотренных элементов (Be, B, C, Mg, Al, Si, O)

Для сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, значения нормированных спектров различных материалов умножены на значения полного выхода нейтронов, полученного в ходе экспериментов в работе [5]. Также учтены указанные в работе [5] значения погрешности результатов.

Абсолютные нейтронные спектры лёгких элементов, являющихся целевыми для (α, n) -реакции, представлены в виде отдельных графиков указанием погрешности результатов в приложении Г.

Точки для спектров, построенных на основе данных, полученных в SOURCES-4C, взяты для средних энергий в каждой из энергетических групп. Сравнение с экспериментальными значениями из работы [5] с учётом погрешностей подтверждает корректность полученных данных.

Кислород, который входит в состав диоксида урана, является целевым для (α , n)-реакции. Тем не менее, оксидное керамическое топливо имеет ряд преимуществ перед металлическим урановым топливом, среди которых особенно отмечают высокую жаропрочность – например, максимальная температура таблетки на реакторе ВВЭР может достигать 1940 °С. Данный факт вкупе с высокой стойкостью к облучению позволяет достигать большой глубины выгорания. Кроме того, диоксид урана хорошо удерживает продукты деления в таблетке.

Минусами оксидного топлива является низкая теплопроводность, величина которой составляет 4,5 Вт/(м·К) при температуре 800 °С, и низкая плотность (10,5 г/см³ против 19 г/см³ для металлического урана) [11, 12].

Легирующие добавки бериллия, углерода и магния улучшают теплопроводность топлива, но при этом их наличие вытесняет некоторый объем диоксида урана. Для сохранения такого же количества топлива, что и в чистом UO₂, потребуется увеличение объема топливной таблетки, что крайне нежелательно ввиду всё ещё не очень хорошей теплопроводности легированного диоксида урана. Особенно остро данная проблема относится к легирующим добавкам алюминия и кремния, которые улучшают и без того высокую механическую прочность UO₂, при этом не улучшая теплопроводность.

Следовательно, введение легирующих добавок Be, C, Mg, Al, Si усложняет технологический процесс изготовления таблеток и при этом не даёт ощутимых преимуществ над нелегированным топливом. Кроме того, все эти элементы, согласно спектрам на рисунке 3.1, имеют либо большее значение выхода нейтронов в результате (α , n)-реакции, либо близкое к таковому для случая с кислородом.

Особенно данная проблема относится к бериллию, для которого выход нейтронов с энергиями до 4 МэВ примерно в 1000 раз выше, чем для кислорода, и при этом бериллий имеет такое значение выхода нейтронов вплоть до энергии примерно 10,5 МэВ.

Бор, благодаря своим свойствам выгорающего поглотителя, мог бы использоваться в качестве добавки к топливу, если бы это не влекло за собой ряд проблем, среди которых – большое значение выхода нейтронов в результате (α, n) -реакции, которое превышает оное для кислорода примерно в 1000 раз в случае энергий нейтронов до 4 МэВ. Тем не менее, бор активно используется в стержнях управления и защиты и в системе жидкостного регулирования, так как α -излучение не проникает за пределы твэла.

По итогам анализа, все рассмотренные лёгкие элементы – Be, B, C, Mg, Al, Si – нецелесообразно использовать в качестве легирующих добавок к диоксиду урана. Следовательно, в рамках данной работы имеет смысл сравнивать лишь топливные составы с выгорающими поглотителями из тяжелых элементов.

Одним из наиболее оптимальных составов модифицированного топлива для реактора типа ВВЭР является UO_2 с 5–8 масс.% Gd_2O_3 . Данный состав уже размещается в твэгах и используется в качестве сильного выгорающего поглотителя для компенсации избыточной реактивности свежего топлива, благодаря чему возможно повышение загрузки топлива и его выгорания.

Тем не менее, преимущество гадолиния как сильнейшего поглотителя тепловых нейтронов также в некотором роде является его недостатком – так как гадолиний выгорает быстро, модифицированное топливо с ним размещают в немногочисленных (по сравнению с твэлами) твэгах, из-за чего возникает неравномерность энерговыделения в ТВС. Кроме того, Gd_2O_3 ухудшает теплопроводность топлива.

Америций и эрбий являются более слабыми по сравнению с гадолинием поглотителями, поэтому топливо с ними предлагается размещать либо во всех твэлах, либо в большей части твэлов без изменения обогащения урана. В таком случае влияния на неравномерность энерговыделения в ТВС оказываться не будет. Кроме того, Er_2O_3 и AmO_2 не оказывают влияния на теплопроводность.

AmO_2 , по сравнению с Er_2O_3 , более эффективен в качестве слабого выгорающего поглотителя – сечение поглощения Am^{241} немного больше

(699,2 б), чем у Er^{167} (645,5 б), поэтому можно обойтись меньшим содержанием легирующей добавки в топливе. По итогу, наиболее оптимальным составом модифицированного топлива является UO_2 с 0,2 ат.% AmO_2 [1].

3.2 Нейтронно-физический расчёт ТВС

3.2.1 Изотопные составы топлива

Топливо № 1 представляет из себя диоксид урана с обогащением 4,89 %, а топливо № 2 имеет обогащение 4,85 %. Их изотопные составы на начало кампании представлены в таблицах 3.1 и 3.2 соответственно.

Таблица 3.1 – Изотопный состав топлива № 1 на начало кампании

Изотоп	Концентрация, (ядер/см ³)·10 ²⁴	Концентрация, г/т(U)
U^{234}	$1,034 \cdot 10^{-5}$	433
U^{235}	$1,163 \cdot 10^{-3}$	48900
U^{236}	$5,404 \cdot 10^{-6}$	228
U^{238}	$2,232 \cdot 10^{-2}$	951000
О (прир.)	$4,700 \cdot 10^{-2}$	137734

Таблица 3.2 – Изотопный состав топлива № 2 на начало кампании

Изотоп	Концентрация, (ядер/см ³)·10 ²⁴	Концентрация, г/т(U)
U^{234}	$1,021 \cdot 10^{-5}$	429
U^{235}	$1,149 \cdot 10^{-3}$	48500
U^{236}	$5,342 \cdot 10^{-6}$	226
U^{238}	$2,228 \cdot 10^{-2}$	952000
О (прир.)	$4,689 \cdot 10^{-2}$	137815

Топливо № 3 представляет из себя гомогенную смесь UO_2 и AmO_2 , обогащение по U^{235} составляет 4,9 %. Изотопный состав топлива на начало кампании представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Изотопный состав топлива № 3 на начало кампании

Изотоп	Концентрация, (ядер/см ³)·10 ²⁴	Концентрация, г/т(U)
U^{234}	$1,032 \cdot 10^{-5}$	433
U^{235}	$1,161 \cdot 10^{-3}$	49000
U^{236}	$5,394 \cdot 10^{-6}$	228
U^{238}	$2,228 \cdot 10^{-2}$	951000
Am^{241}	$4,386 \cdot 10^{-5}$	1900
Am^{242}	$1,669 \cdot 10^{-6}$	73
Am^{243}	$8,298 \cdot 10^{-7}$	36
О (прир.)	$4,701 \cdot 10^{-2}$	138024

Значения ядерной концентрации в таблицах 3.1-3.3 имеют множитель 10^{24} , т. к. этот множитель опускается при задании и выводе данных в WIMS.

Концентрация кислорода с единицами измерения (ядер/см³)· 10^{24} представлена суммой концентраций изотопов O^{16} , O^{17} , O^{18} . Данное значение является удвоенной суммой ядерных концентраций изотопов урана согласно химической формуле топлива UO_2 . Концентрация кислорода с единицами измерения г/т(U) вычисляется согласно известным значениям концентраций изотопов урана в г/т(U) и массовой доли смеси изотопов урана в топливе.

Значение концентрации кислорода в рамках данной работы принимается постоянным во всех случаях.

В дальнейшем будут рассматриваться только значения концентраций изотопов с единицами измерения г/т(U) по причине более наглядного представления результатов.

3.2.2 Анализ результатов нейтронно-физического расчёта

В качестве примера в приложении Д приведены графики зависимости концентраций различных нуклидов от времени для топлива № 1, построенные на основе данных, полученных в WIMS. Характер изменения кривых качественно соответствует приведенным и описанным в [14] зависимостям, что говорит о правильности построенной модели и проведенного расчёта в WIMS-D5B.

В случае топлива № 3, концентрация изотопа Am^{241} , свойства которого как выгорающего поглотителя являются наилучшими среди прочих изотопов америция [1], падает по мере работы реактора, что также подтверждает правильность расчёта – поглотитель действительно выгорает.

Сравним графики зависимости k_{∞} от времени и энерговыработки, представленные на рисунке 3.2 для различных топливных составов. Результаты для UO_2 с обогащением 4,89 % и 4,85 % близки, поэтому случаи с топливом № 1 и 2 представлены одним графиком.

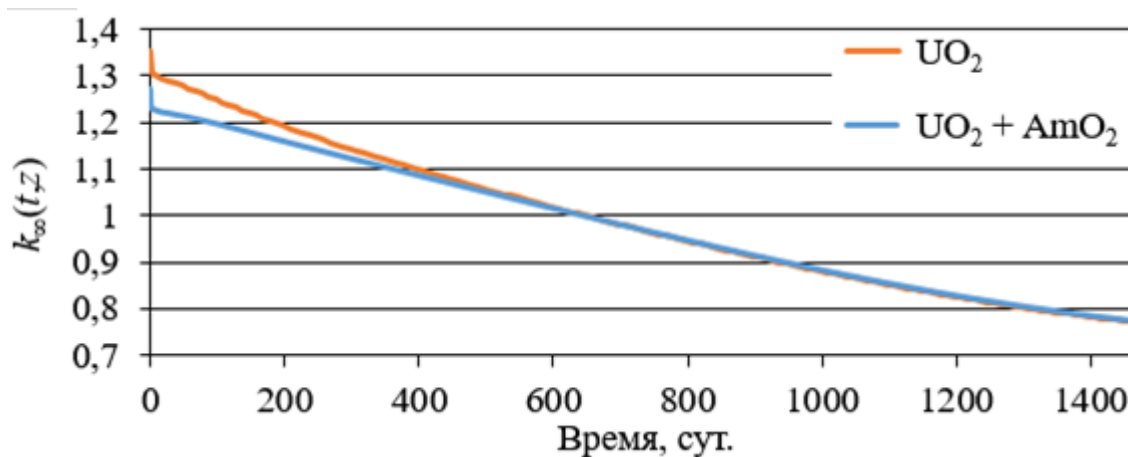


Рисунок 3.2 – Сравнение зависимостей k_{∞} от времени и энерговыработки

Во всех случаях коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде на конец кампании оказался равным 0,77. На начало кампании k_{∞} для топлива с UO_2 составляет 1,35, а в случае топлива $UO_2 + AmO_2$ он снижается до 1,27. Следовательно, AmO_2 действительно эффективен как выгорающий поглотитель, так как его наличие снижает избыточную реактивность свежего топлива, при этом не влияя на длительность кампании реактора.

Как итог, расчёт с помощью программы WIMS-D5B позволяет получить качественное представление изменения концентраций различных изотопов во времени и на основе полученных данных построить графики, а также оценить характер изменения коэффициента размножения.

Тем не менее, методы, используемые для расчёта в WIMS, дают некоторую погрешность результатов. Чтобы оценить её, примем в качестве истинных значений данные авторов [1], которые были получены в программе MCNP6.2, использующей для расчёта метод Монте-Карло.

Относительная погрешность значений концентраций изотопов урана на конец кампании не превышает 6 %. Однако погрешность возрастает для вышестоящих нуклидов и может составлять вплоть до 37 % в случае Am^{243} . Это объясняется тем, что при решении дифференциальных уравнений, программа WIMS-D5B использует значения сечений взаимодействий всех элементов цепочки, по которой образовался тот или иной нуклид, из-за чего накапливается погрешность для вышестоящих нуклидов.

Отсутствие данных о концентрациях U^{233} , Cm^{242} и Cm^{244} на конец кампании, рассчитанных в WIMS-D5B, объясняется тем, что программа выводит значения концентраций данных изотопов равными нулю.

Более того, WIMS-D5B не позволяет проводить расчёт для случая, когда ОЯТ находится на выдержке, по причине того, что значения концентраций изотопов согласно расчёту в никак не изменяются со временем, если глубина выгорания в программе задана нулевой.

Ввиду всего вышесказанного, в рамках данной работы в дальнейшем будут использоваться данные о концентрациях нуклидов, приведённые авторами [1] как в случае ОЯТ на конец кампании, так и в случае с выдержкой.

3.3 Спектры нейтронного излучения топлива

3.3.1 Топливо с изотопным составом № 1

Суммарный спектр нейтронов спонтанного деления и нейтронов (α , n)-реакции представлен на рисунке 3.3.

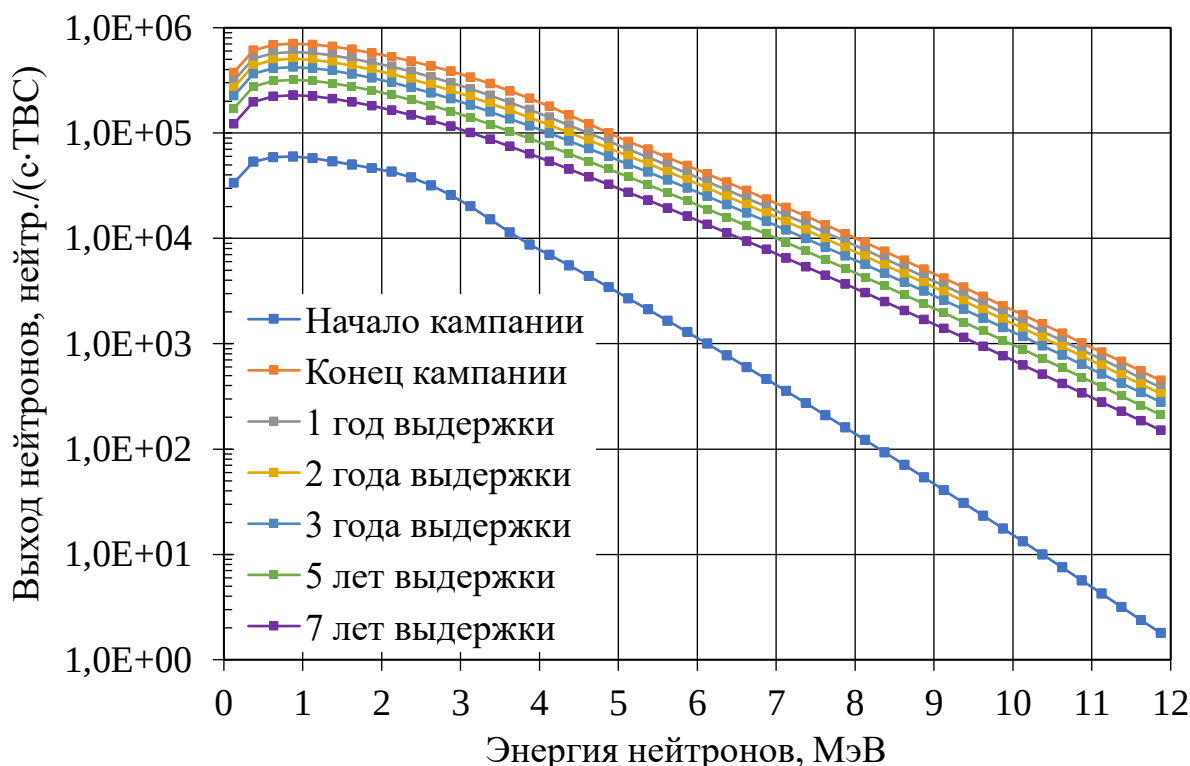


Рисунок 3.3 – Суммарный спектр нейтронов топлива № 1

Отдельные спектры нейтронов спонтанного деления и нейтронов (α , n)-реакции представлен на рисунке 3.4.

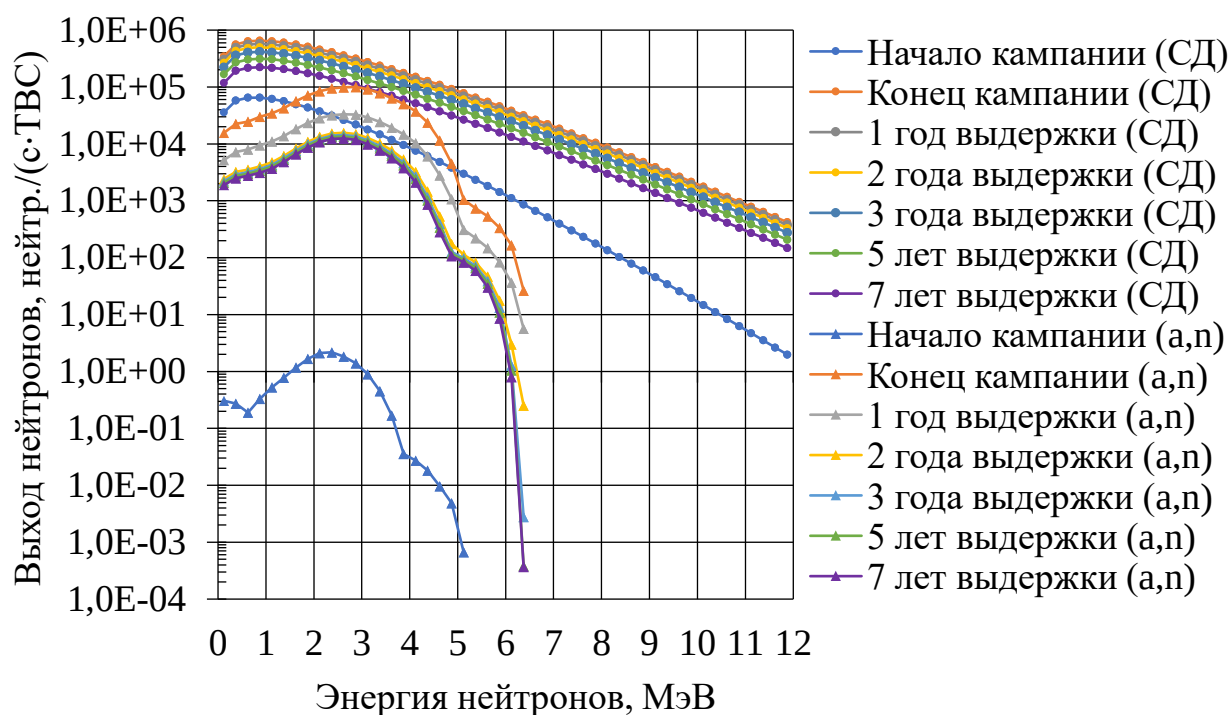


Рисунок 3.4 – Нейтронные спектры топлива № 1

Данные об интегральном выходе нейтронов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Интегральный выход нейтронов топлива № 1, нейтр./с·ТВС

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
СД	$6,41 \cdot 10^5$	$7,88 \cdot 10^6$	$6,92 \cdot 10^6$	$6,07 \cdot 10^6$	$5,05 \cdot 10^6$	$3,81 \cdot 10^6$	$2,70 \cdot 10^6$
(α , n)	$1,44 \cdot 10^1$	$1,04 \cdot 10^6$	$3,31 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^5$	$1,22 \cdot 10^5$	$1,12 \cdot 10^5$
Всего	$6,41 \cdot 10^5$	$8,92 \cdot 10^6$	$7,26 \cdot 10^6$	$6,21 \cdot 10^6$	$5,18 \cdot 10^6$	$3,93 \cdot 10^6$	$2,81 \cdot 10^6$

Данные таблицы 3.4 также приведены в таблице 3.5 в виде вклада реакций в суммарный нейтронный спектр.

Таблица 3.5 – Вклад реакций в нейтронный спектр топлива № 1, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
СД	100,00	88,34	95,43	97,68	97,48	96,90	96,03
(α , n)	0,00	11,66	4,57	2,32	2,52	3,10	3,97

Вклад различных изотопов в спектр нейтронов спонтанного деления представлен в виде графика на рисунке 3.5 и в процентном соотношении в таблице 3.6.

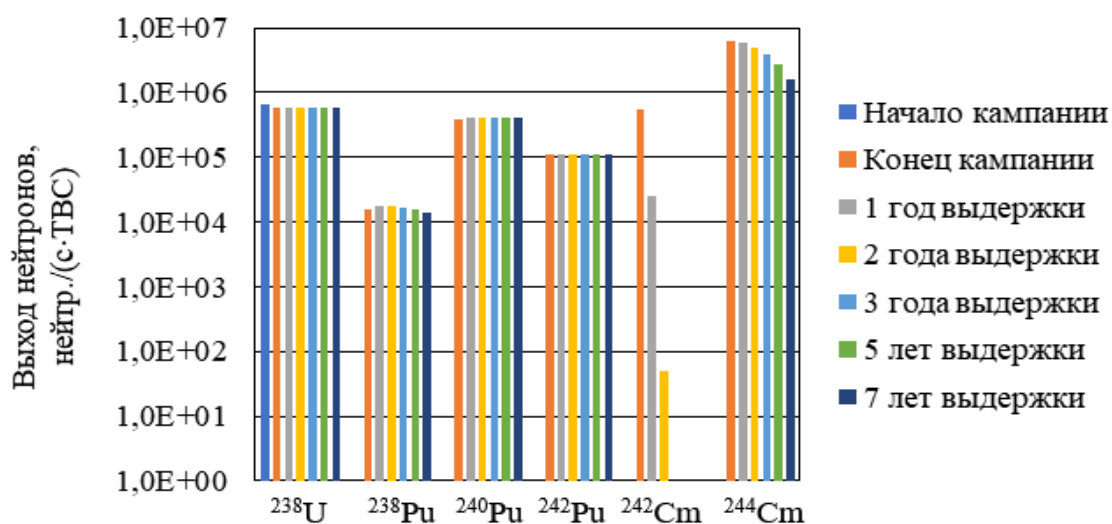


Рисунок 3.5 – Вклад изотопов в спектр нейтронов СД топлива № 1

Таблица 3.6 – Вклад изотопов в спектр нейтронов СД топлива № 1, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
^{238}U	100,00	7,57	8,63	9,83	11,82	15,70	22,15
^{238}Pu	0,00	0,20	0,26	0,29	0,33	0,41	0,52
^{240}Pu	0,00	5,00	5,75	6,57	7,93	10,64	15,15
^{242}Pu	0,00	1,43	1,62	1,85	2,22	2,95	4,16
^{242}Cm	0,00	7,10	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
^{244}Cm	0,00	78,70	83,37	81,45	77,69	70,30	58,02

Вклад различных изотопов в интенсивность альфа-излучения представлен в виде графика на рисунке 3.6 и в процентном соотношении в таблице 3.7.

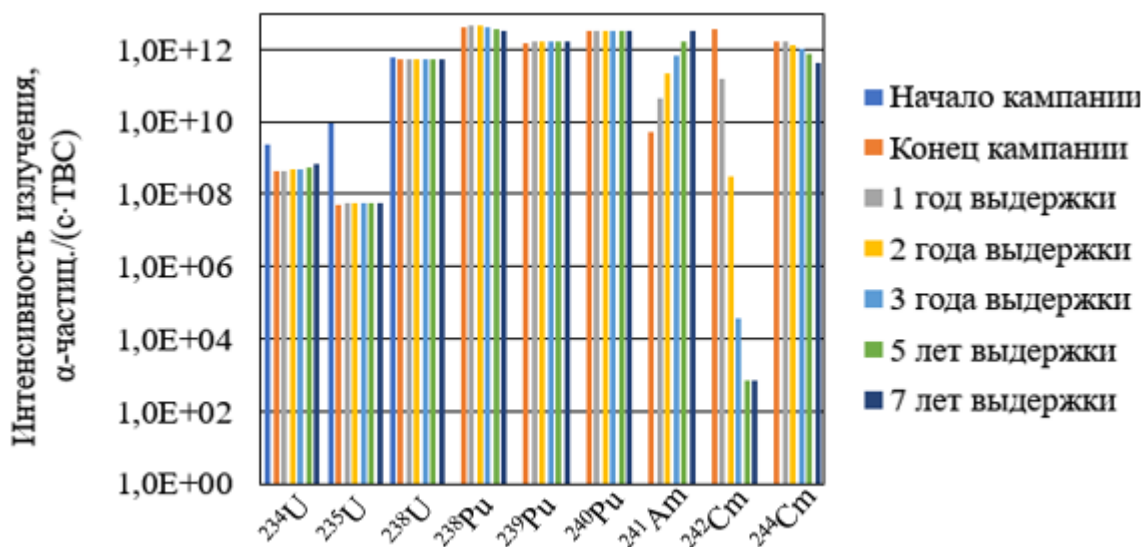


Рисунок 3.6 – Интенсивность альфа-излучения изотопов топлива № 1

Таблица 3.7 – Вклад изотопов в интенсивность α -излучения топлива № 1, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
^{234}U	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
^{235}U	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
^{238}U	98,07	3,80	4,73	4,83	4,84	4,69	4,39
^{238}Pu	0,00	27,18	37,66	38,09	36,46	32,67	27,39
^{239}Pu	0,00	10,74	14,17	14,44	14,47	14,02	13,12
^{240}Pu	0,00	22,13	27,77	28,47	28,63	28,04	26,51
^{241}Am	0,00	0,04	0,39	1,95	5,83	14,02	24,89
^{242}Cm	0,00	24,10	1,37	0,00	0,00	0,00	0,00
^{244}Cm	0,00	11,74	13,58	11,89	9,45	6,24	3,42

Так как интенсивность альфа-излучения для каждого изотопа известна, можно нормировать данные значения на единицу и умножить их на интегральный выход (α, n) -нейтронов. Если получившееся значение сложить с интегральным выходом нейтронов спонтанного деления для отдельного изотопа, то получим значение выхода нейтронов с диоксида данного изотопа.

Вклад диоксидов различных изотопов в суммарный спектр нейтронов представлен в виде графика на рисунке 3.7 и в процентном соотношении в таблице 3.8.

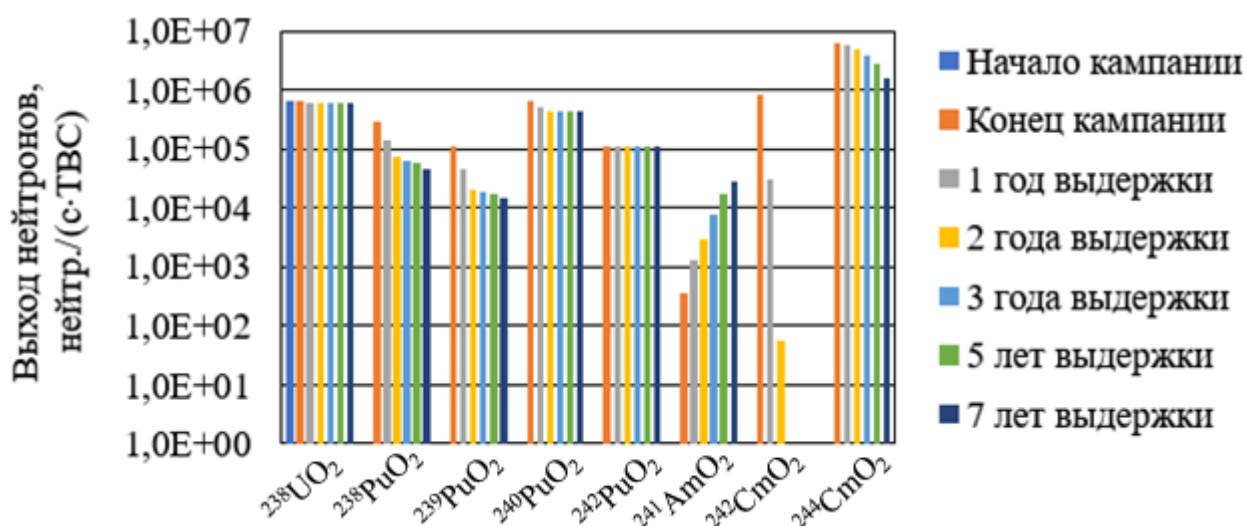


Рисунок 3.7 – Вклад диоксидов в суммарный спектр нейтронов топлива № 1

Таблица 3.8 – Вклад диоксидов в спектр нейтронов топлива № 1, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
$^{238}\text{UO}_2$	100,00	7,13	8,46	9,72	11,65	15,36	21,44
$^{238}\text{PuO}_2$	0,00	3,35	1,97	1,17	1,24	1,41	1,58
$^{239}\text{PuO}_2$	0,00	1,25	0,65	0,34	0,36	0,43	0,52
$^{240}\text{PuO}_2$	0,00	7,00	6,75	7,08	8,45	11,18	15,60
$^{242}\text{PuO}_2$	0,00	1,27	1,55	1,81	2,17	2,86	4,00
$^{241}\text{AmO}_2$	0,00	0,00	0,02	0,05	0,15	0,43	0,99
$^{242}\text{CmO}_2$	0,00	9,08	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00
$^{244}\text{CmO}_2$	0,00	70,89	80,19	79,84	75,97	68,31	55,86

3.3.2 Топливо с изотопным составом № 2

Суммарный спектр нейтронов спонтанного деления и нейтронов (α , n)-реакции представлен на рисунке 3.8.

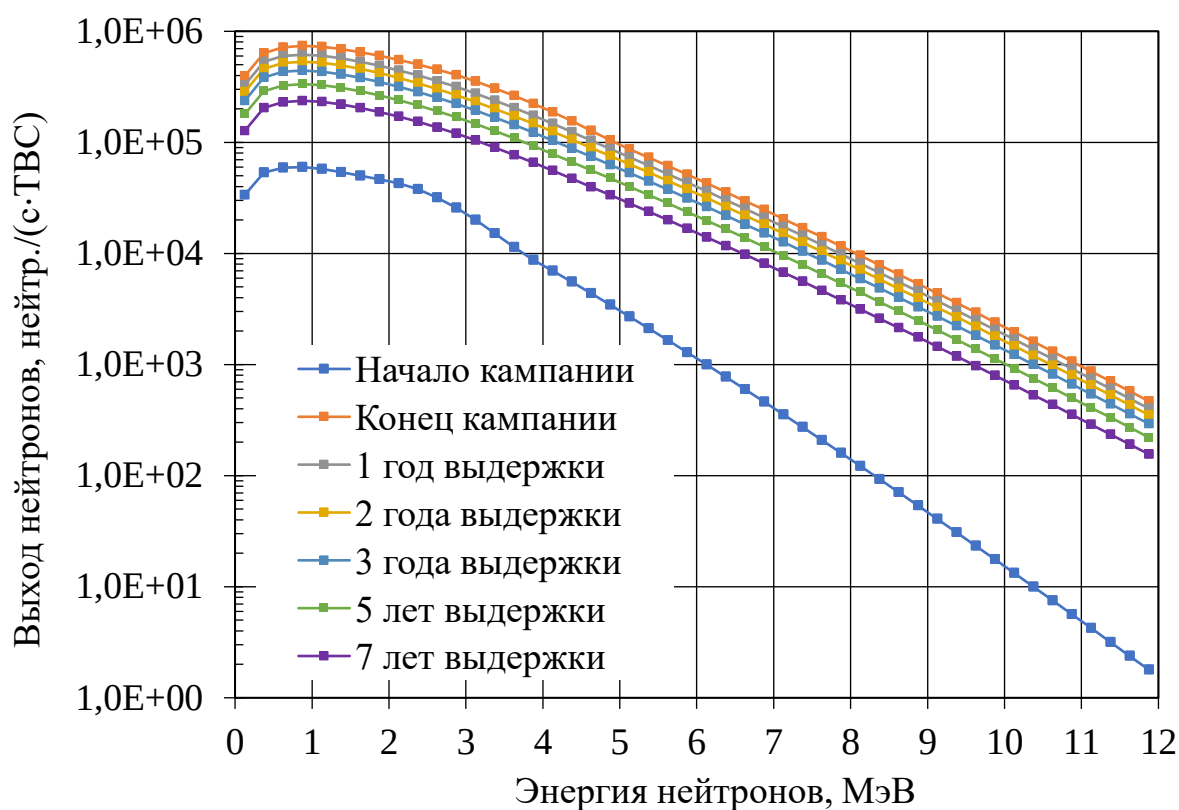


Рисунок 3.8 – Суммарный спектр нейтронов топлива № 2

Отдельные спектры нейтронов спонтанного деления и нейтронов (α , n)-реакции представлен на рисунке 3.9.

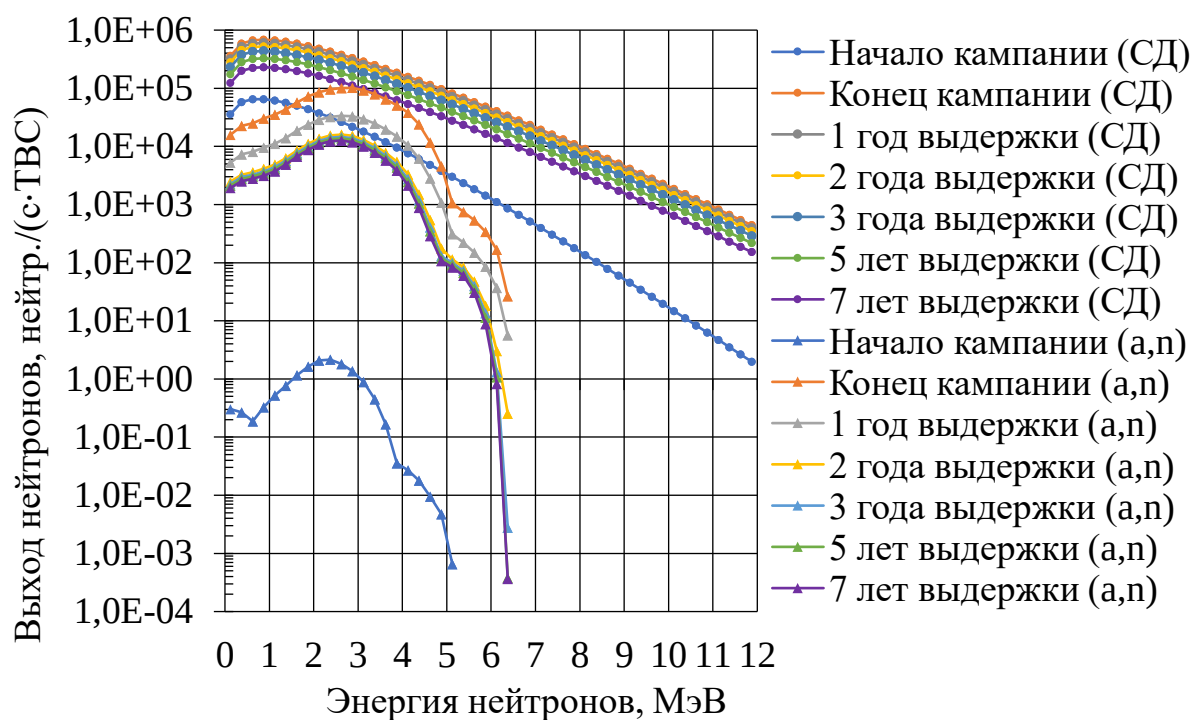


Рисунок 3.9 – Нейтронные спектры топлива № 2

Данные об интегральном выходе нейтронов представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Интегральный выход нейтронов топлива № 2, нейтр./с·ТВС

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
СД	$6,41 \cdot 10^5$	$8,27 \cdot 10^6$	$7,26 \cdot 10^6$	$6,37 \cdot 10^6$	$5,30 \cdot 10^6$	$3,97 \cdot 10^6$	$2,80 \cdot 10^6$
(α , n)	$1,42 \cdot 10^1$	$1,05 \cdot 10^6$	$3,35 \cdot 10^5$	$1,47 \cdot 10^5$	$1,32 \cdot 10^5$	$1,24 \cdot 10^5$	$1,13 \cdot 10^5$
Всего	$6,41 \cdot 10^5$	$9,32 \cdot 10^6$	$7,59 \cdot 10^6$	$6,51 \cdot 10^6$	$5,43 \cdot 10^6$	$4,10 \cdot 10^6$	$2,91 \cdot 10^6$

Данные таблицы 3.9 также приведены в таблице 3.10 в виде вклада реакций в суммарный нейтронный спектр.

Таблица 3.10 – Вклад реакций в нейтронный спектр топлива № 2, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
СД	100,00	88,71	95,58	97,75	97,56	96,98	96,12
(α , n)	0,00	11,29	4,42	2,25	2,44	3,02	3,88

Вклад различных изотопов в спектр нейтронов спонтанного деления представлен в виде графика на рисунке 3.10 и в процентном соотношении в таблице 3.11.

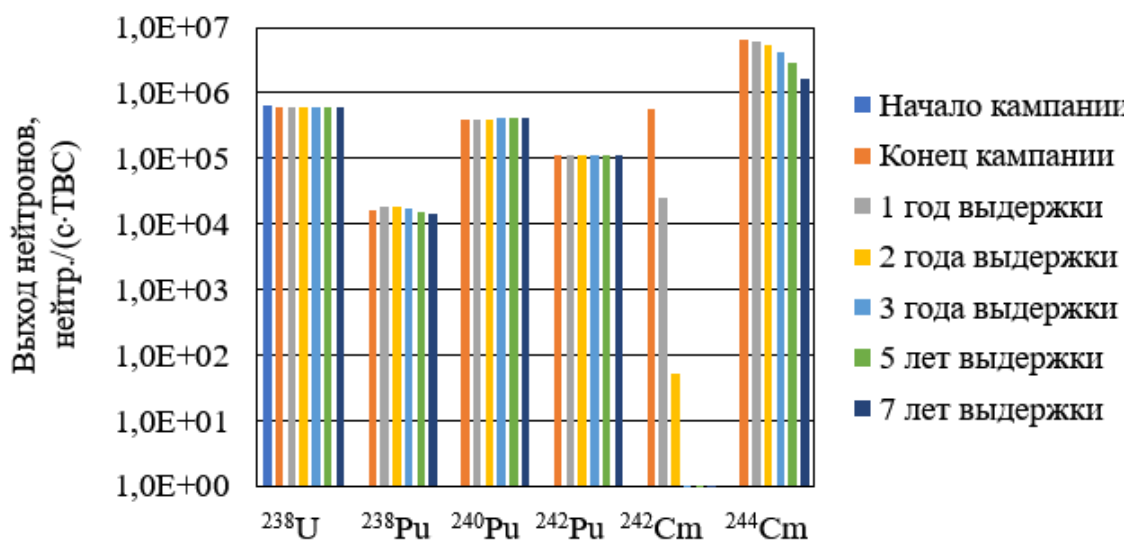


Рисунок 3.10 – Вклад изотопов в спектр нейтронов СД топлива № 2

Таблица 3.11 – Вклад изотопов в спектр нейтронов СД топлива № 2, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
^{238}U	100,00	7,20	8,20	9,34	11,23	14,97	21,31
^{238}Pu	0,00	0,19	0,25	0,28	0,32	0,39	0,50
^{240}Pu	0,00	4,82	5,49	6,29	7,63	10,23	14,69
^{242}Pu	0,00	1,39	1,59	1,81	2,17	2,90	4,12
^{242}Cm	0,00	6,92	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00
^{244}Cm	0,00	79,47	84,13	82,28	78,64	71,50	59,37

Вклад различных изотопов в интенсивность альфа-излучения представлен в виде графика на рисунке 3.11 и в процентном соотношении в таблице 3.12.

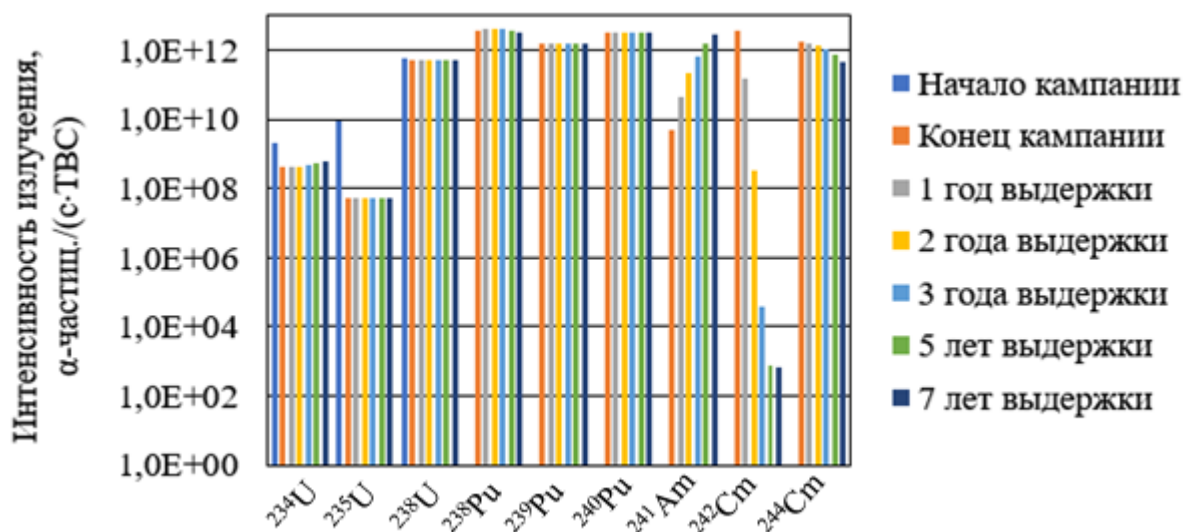


Рисунок 3.11 – Интенсивность альфа-излучения изотопов топлива № 2

Таблица 3.12 – Вклад изотопов в интенсивность α -излучения топлива № 2, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
^{234}U	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
^{235}U	1,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
^{238}U	98,11	3,74	4,67	4,77	4,78	4,65	4,36
^{238}Pu	0,00	26,89	37,44	37,98	36,33	32,65	27,50
^{239}Pu	0,00	10,53	13,97	14,25	14,28	13,89	13,01
^{240}Pu	0,00	22,03	27,59	28,27	28,60	28,00	26,51
^{241}Am	0,00	0,03	0,38	1,92	5,76	13,91	24,72
^{242}Cm	0,00	24,26	1,37	0,00	0,00	0,00	0,00
^{244}Cm	0,00	12,24	14,25	12,47	9,93	6,59	3,61

Вклад диоксидов различных изотопов в суммарный спектр нейтронов представлен на рисунке 3.12 и в процентном соотношении в таблице 3.13.

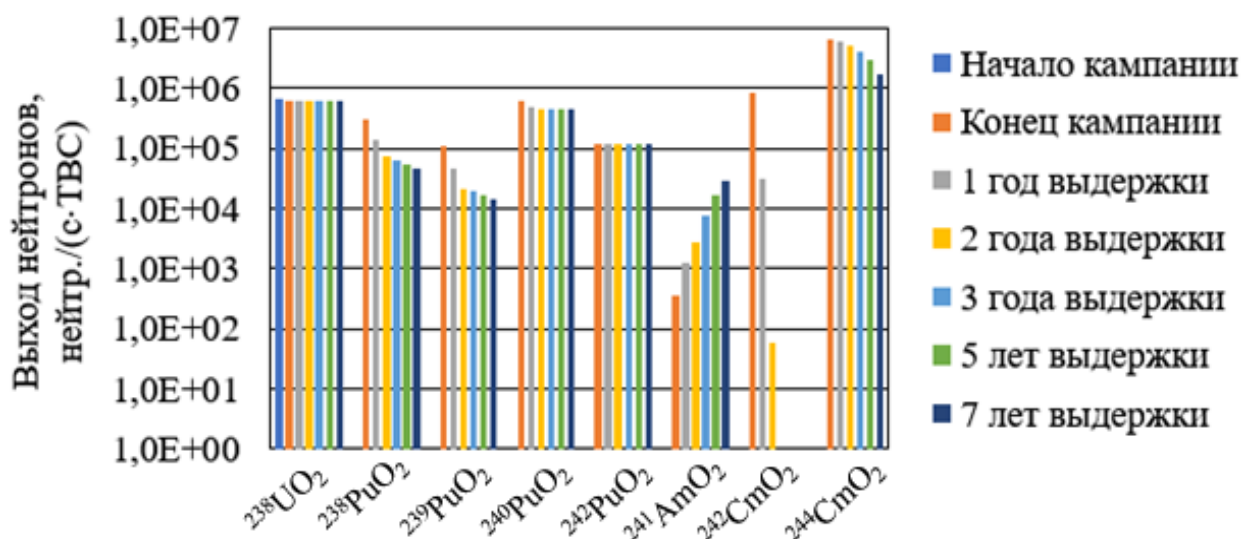


Рисунок 3.12 – Вклад диоксидов в суммарный спектр нейтронов топлива № 2

Таблица 3.13 – Вклад диоксидов в спектр нейтронов топлива № 2, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
$^{238}\text{UO}_2$	100,00	6,81	8,04	9,24	11,08	14,66	20,65
$^{238}\text{PuO}_2$	0,00	3,21	1,89	1,13	1,20	1,37	1,55
$^{239}\text{PuO}_2$	0,00	1,19	0,62	0,32	0,35	0,42	0,51
$^{240}\text{PuO}_2$	0,00	6,76	6,47	6,78	8,14	10,77	15,15
$^{242}\text{PuO}_2$	0,00	1,24	1,52	1,77	2,12	2,81	3,96
$^{241}\text{AmO}_2$	0,00	0,00	0,02	0,04	0,14	0,42	0,96
$^{242}\text{CmO}_2$	0,00	8,88	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
$^{244}\text{CmO}_2$	0,00	71,88	81,04	80,71	76,97	69,54	57,21

3.3.3 Топливо с изотопным составом № 3

Суммарный нейтронный спектр представлен на рисунке 3.13.

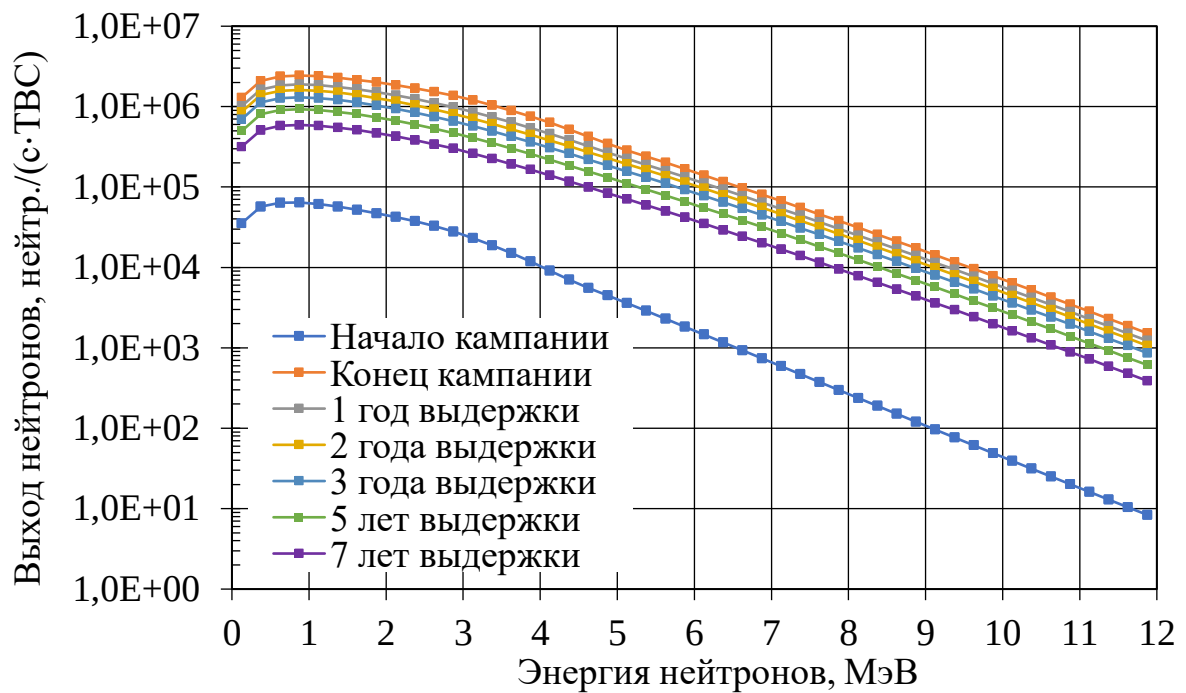


Рисунок 3.13 – Суммарный спектр нейтронов топлива № 3

Отдельные спектры нейтронов спонтанного деления и нейтронов (α , n)-реакции представлен на рисунке 3.14.

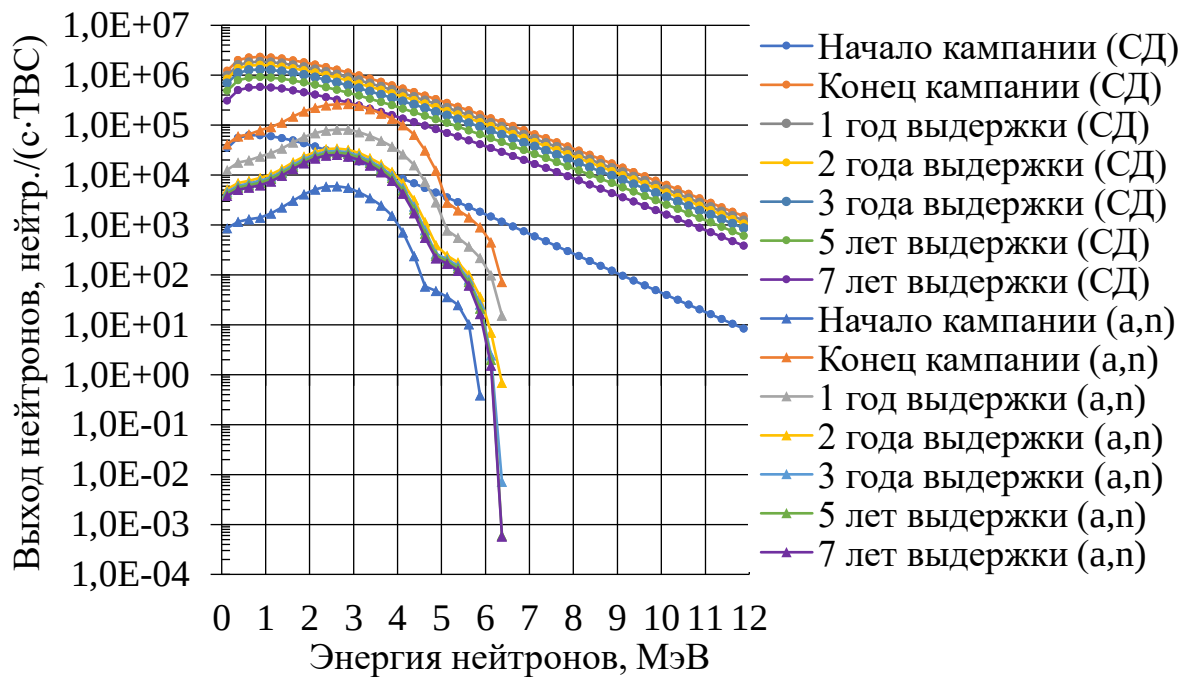


Рисунок 3.14 – Нейтронные спектры топлива № 3

Данные об интегральном выходе нейтронов сведены в таблицу 3.14.

Таблица 3.14 – Интегральный выход нейтронов топлива № 3, нейтр./(с·ТВС)

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
СД	$6,40 \cdot 10^5$	$2,82 \cdot 10^7$	$2,26 \cdot 10^7$	$1,95 \cdot 10^7$	$1,57 \cdot 10^7$	$1,11 \cdot 10^7$	$7,04 \cdot 10^6$
(α , n)	$5,16 \cdot 10^4$	$2,77 \cdot 10^6$	$8,24 \cdot 10^5$	$3,12 \cdot 10^5$	$2,74 \cdot 10^5$	$2,52 \cdot 10^5$	$2,26 \cdot 10^5$
Всего	$6,92 \cdot 10^5$	$3,10 \cdot 10^7$	$2,35 \cdot 10^7$	$1,98 \cdot 10^7$	$1,60 \cdot 10^7$	$1,14 \cdot 10^7$	$7,27 \cdot 10^6$

Данные таблицы 3.14 также приведены в таблице 3.15 в виде вклада реакций в суммарный нейтронный спектр.

Таблица 3.15 – Вклад реакций в нейтронный спектр топлива № 3, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
СД	92,55	91,06	96,49	98,42	98,29	97,79	96,89
(α , n)	7,45	8,94	3,51	1,58	1,71	2,21	3,11

Вклад различных изотопов в спектр нейтронов спонтанного деления представлен в виде графика на рисунке 3.15 и в процентном соотношении в таблице 3.16.

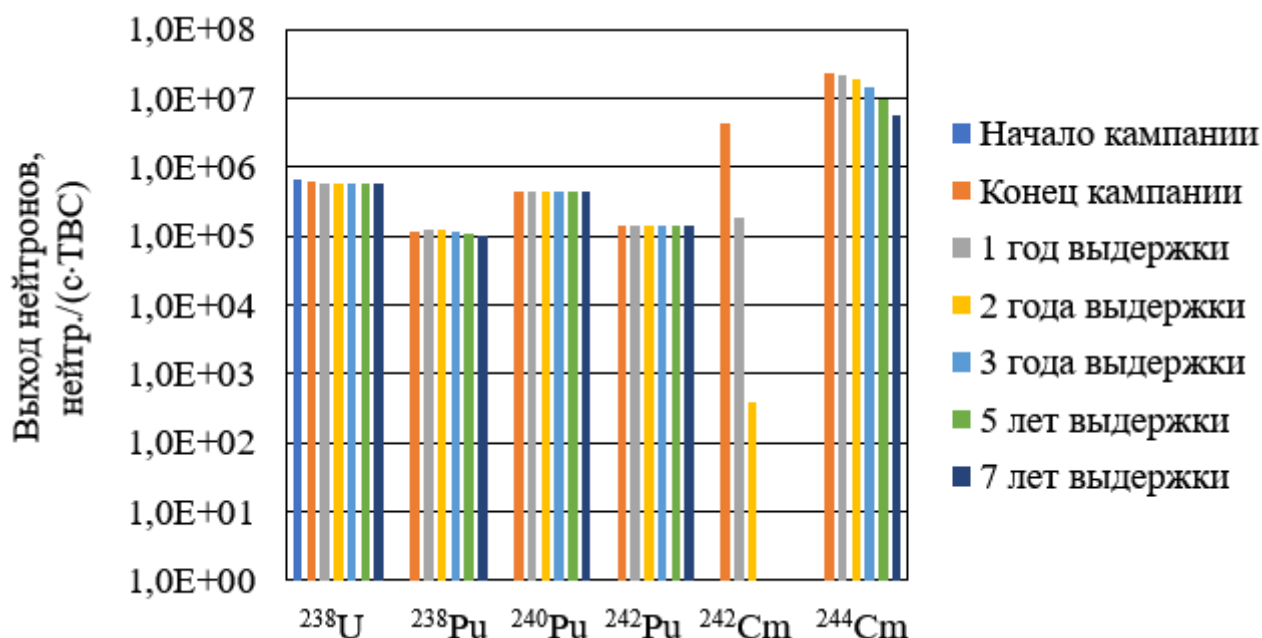


Рисунок 3.15 – Вклад изотопов в спектр нейтронов СД топлива № 3

Таблица 3.16 – Вклад изотопов в спектр нейтронов СД топлива № 3, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
^{238}U	100	2,12	2,62	3,05	3,78	5,33	8,44
^{238}Pu	0	0,40	0,55	0,64	0,76	0,99	1,40
^{240}Pu	0	1,52	1,89	2,22	2,78	4,00	6,46
^{242}Pu	0	0,51	0,63	0,73	0,91	1,28	2,03
^{242}Cm	0	14,95	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00
^{244}Cm	0	80,49	93,46	93,35	91,78	88,40	81,68

Вклад различных изотопов в интенсивность альфа-излучения представлен в виде графика на рисунке 3.16 и в процентном соотношении в таблице 3.17.

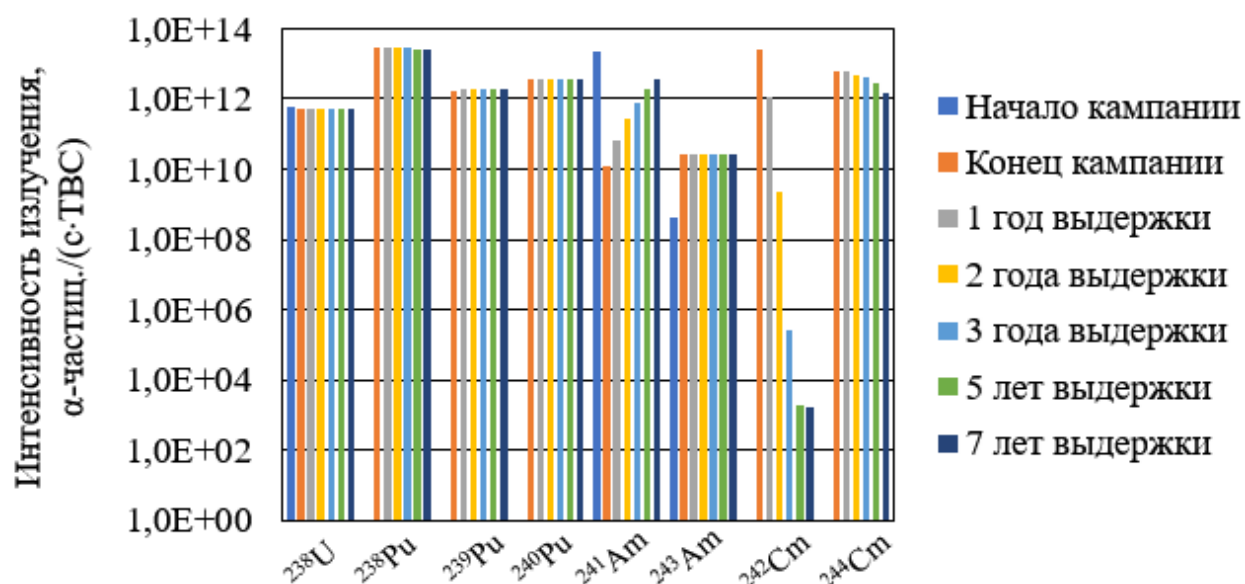


Рисунок 3.16 – Интенсивность альфа-излучения изотопов топлива № 3

Таблица 3.17 – Вклад изотопов в интенсивность α-излучения топлива № 3, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
^{238}U	2,40	0,83	1,25	1,31	1,37	1,45	1,54
^{238}Pu	0,00	42,24	70,36	73,21	73,12	71,72	68,23
^{239}Pu	0,00	2,64	4,20	4,40	4,60	4,88	5,19
^{240}Pu	0,00	5,26	7,96	8,40	8,91	9,61	10,42
^{241}Am	97,55	0,02	0,15	0,67	1,97	5,05	10,03
^{243}Am	0,00	0,04	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08
^{242}Cm	0,00	39,56	2,70	0,01	0,00	0,00	0,00
^{244}Cm	0,00	9,36	13,25	11,89	9,90	7,15	4,44

Вклад диоксидов различных изотопов в суммарный спектр нейтронов представлен в виде графика на рисунке 3.17 и в процентном соотношении в таблице 3.18.

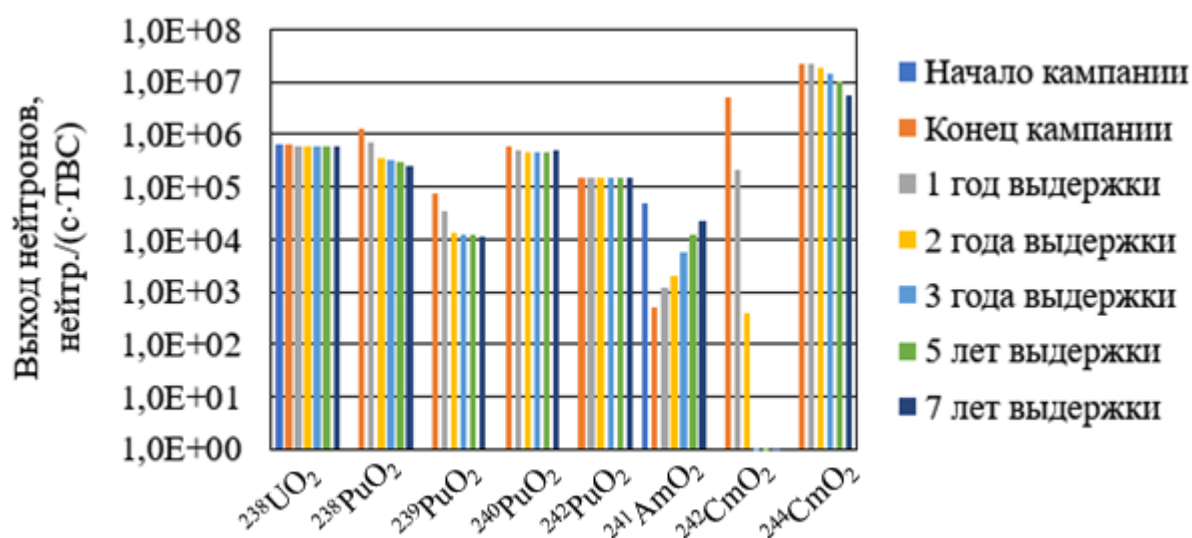


Рисунок 3.17 – Вклад диоксидов в суммарный спектр нейтронов топлива № 3

Таблица 3.18 – Вклад диоксидов в спектр нейтронов топлива № 3, %

	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
$^{238}\text{UO}_2$	92,69	2,00	2,57	3,03	3,73	5,25	8,22
$^{238}\text{PuO}_2$	0,00	4,15	3,00	1,79	1,99	2,55	3,48
$^{239}\text{PuO}_2$	0,00	0,24	0,15	0,07	0,08	0,11	0,16
$^{240}\text{PuO}_2$	0,00	1,86	2,10	2,32	2,89	4,13	6,58
$^{242}\text{PuO}_2$	0,00	0,47	0,61	0,72	0,89	1,26	1,97
$^{241}\text{AmO}_2$	7,30	0,00	0,01	0,01	0,03	0,11	0,31
$^{242}\text{CmO}_2$	0,00	17,15	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00
$^{244}\text{CmO}_2$	0,00	74,13	90,65	92,06	90,37	86,60	79,27

3.3.4 Сравнительный анализ полученных результатов

Данные по нейтронным спектрам трёх топливных составов в целях сравнения сведены в таблицы 3.19 и 3.20.

Таблица 3.19 – Суммарный интегральный выход нейтронов, нейтр./(с·ТВС)

Состав	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	$6,41 \cdot 10^5$	$8,92 \cdot 10^6$	$7,26 \cdot 10^6$	$6,21 \cdot 10^6$	$5,18 \cdot 10^6$	$3,93 \cdot 10^6$	$2,81 \cdot 10^6$
№ 2	$6,41 \cdot 10^5$	$9,32 \cdot 10^6$	$7,59 \cdot 10^6$	$6,51 \cdot 10^6$	$5,43 \cdot 10^6$	$4,10 \cdot 10^6$	$2,91 \cdot 10^6$
№ 3	$6,92 \cdot 10^5$	$3,10 \cdot 10^7$	$2,35 \cdot 10^7$	$1,98 \cdot 10^7$	$1,60 \cdot 10^7$	$1,14 \cdot 10^7$	$7,27 \cdot 10^6$

Таблица 3.20 – Вклад (α , n)-реакции в нейтронный спектр, %

Состав	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	0,00	11,66	4,57	2,32	2,52	3,10	3,97
№ 2	0,00	11,29	4,42	2,25	2,44	3,02	3,88
№ 3	7,45	8,94	3,51	1,58	1,71	2,21	3,11

Основным источником нейтронного излучения в ОЯТ являются ядра ^{244}Cm , претерпевающие спонтанное деление. ^{244}Cm образуется при захвате α -частицы изотопом ^{240}Pu .

Из таблицы 21 видно, что при увеличении обогащения топлива интегральный выход нейтронов уменьшается. Это происходит из-за того, что при меньшей концентрации U^{238} путем последовательных радиационных захватов меньше образуется меньше ^{240}Pu и, соответственно, меньше ^{244}Cm .

Вклад (α , n)-реакции в спектр нейтронного излучения ОЯТ значителен лишь на конец кампании реактора, так как уже через 1-2 года выдержки большинство ядер ^{242}Cm , вносящих большой вклад в интенсивность α -излучения, распадается. Далее вклад (α , n)-реакции растёт по мере распада ^{244}Cm .

Выход нейтронов свежего топлива из UO_2 мал и почти полностью обусловлен спонтанным делением ^{238}U . При введении AmO_2 выход нейтронов свежего топлива увеличивается из-за наличия (α , n)-реакции. ^{241}Am является относительно сильным α -излучателем, что можно увидеть на рисунке 3.16.

В ходе работы реактора америций выгорает, поглощая нейтроны. При этом образуются изотопы кюрия, в том числе ^{244}Cm , что в свою очередь ведет к значительному увеличению выхода нейтронов ОЯТ.

Исходя из таблицы 22, по сравнению с топливом из нелегированного UO_2 с обогащением 4,89 %, интегральный выход нейтронов ОЯТ после 7 лет выдержки в случае $\text{UO}_2 + 0,2 \text{ ат.}\% \text{ AmO}_2$ выше в 2,6 раз. Тем не менее, данный факт сам по себе не означает, что применение AmO_2 в качестве легирующей добавки нецелесообразно. Для дальнейшего анализа необходимо сравнить дозовые нагрузки ОЯТ с разным составом.

3.4 Расчёт мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения

Для оценки биологического эффекта облучения ионизирующим излучением используется понятие эквивалентной дозы:

$$H_{T,R} = \sum_R w_R D_R, \quad (3.1)$$

где $H_{T,R}$ – эквивалентная доза, Зв;

w_R – взвешивающий коэффициент излучения;

D_R – поглощенная доза, Гр [36].

На практике для расчета поглощенной дозы от нейтронов с энергией не более 20 МэВ используется керма-приближение:

$$D \cong \int F(E)k(E)dE, \quad (3.2)$$

где $F(E)$ – распределение флюенса нейтронов, нейтр./см²;

$k(E)$ – нейтронный керма-фактор, Гр·см²/нейтр. [37].

Нейтронный керма-фактор представляет собой сумму начальных кинетических энергий всех заряженных частиц, освобождаемых в элементе массы под действием единичного флюенса нейтронов. Керма-фактор удобен тем, что определяется только свойствами ядра, поэтому может быть рассчитан заранее. На рисунке 3.18 представлена зависимость керма-фактора в тканеэквивалентном материале от энергии нейтронов (эВ) [38].

Ввиду отсутствия данных в ином виде, кроме как в виде графика на рисунке 3.18, воспользуемся методом наименьших квадратов для получения аппроксимирующей полиномиальной функции. Построим новый график по ключевым точкам графика на рисунке 3.18, проведем его аппроксимацию.

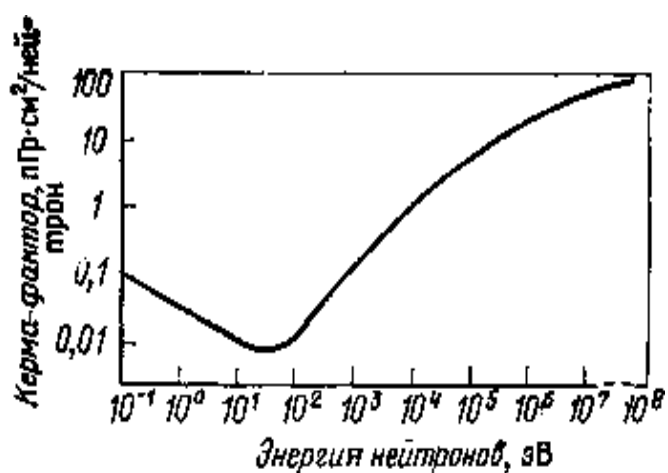


Рисунок 3.18 – График зависимости керма-фактора от энергии нейтронов (эВ) в тканеэквивалентном материале [38]

Построенный с помощью программы Origin 7.0 график зависимости керма-фактора от энергии нейтронов (МэВ) в тканеэквивалентном материале и аппроксимирующая его линия тренда представлены на рисунке 3.19.

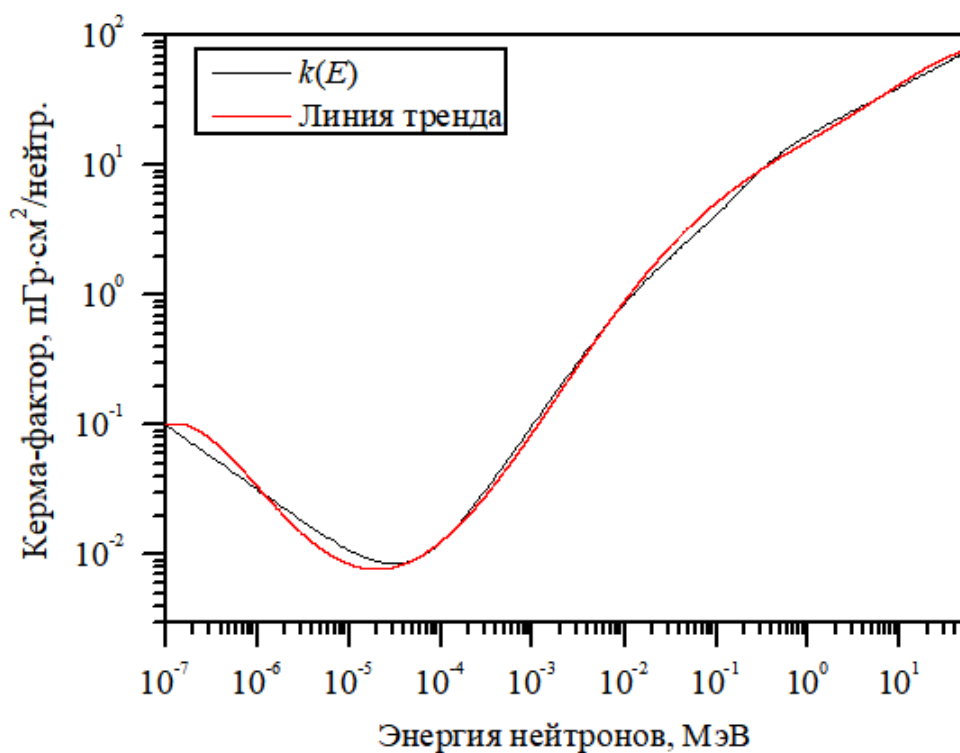


Рисунок 3.19 – Зависимость керма-фактора от энергии нейтронов (МэВ) в тканеэквивалентном материале

Аппроксимирующей функцией графика на рисунке 3.19 является полином 7-й степени:

$$k(E) = 1,19068 + 0,41621 \cdot E - 0,00828 \cdot E^2 + 0,04886 \cdot E^3 - \\ - 0,01104 \cdot E^4 - 0,00798 \cdot E^5 - 9,84345 \cdot 10^{-4} \cdot E^6 - 3,16715 \cdot 10^{-5} \cdot E^7 \quad (3.3)$$

Учитывая, что график на рисунке 3.19 построен в логарифмической шкале с основанием 10, и что единицей измерения $k(E)$ на графике является пГр·см²/нейтр., формула (3.3) преобразуется в:

$$\lg(k(E) \cdot 10^{12}) = 1,19068 + 0,41621 \cdot \lg(E) - 0,00828 \cdot \lg(E^2) + \\ + 0,04886 \cdot \lg(E^3) - 0,01104 \cdot \lg(E^4) - 0,00798 \cdot \lg(E^5) - \\ - 9,84345 \cdot 10^{-4} \cdot \lg(E^6) - 3,16715 \cdot 10^{-5} \cdot \lg(E^7). \quad (3.4)$$

В формуле (3.4) значения энергии нейтронов (E) необходимо брать в МэВ, при этом единицей измерения керма-фактора ($k(E)$) является Гр·см²/нейтр.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,99844$, т. е. близок к единице. Следовательно, аппроксимация является достаточно точной.

Так как в рамках данной работы уже оценено энергетическое распределение выхода нейтронов, то удобнее будет воспользоваться понятием мощности дозы. Тогда формула (3.1) преобразуется в:

$$\dot{H}_{T,R} = \sum_R w_R \dot{D}_R, \quad (3.5)$$

где $\dot{H}_{T,R}$ – мощность эквивалентной дозы, Зв/с;

w_R – взвешивающий коэффициент излучения;

$\dot{D}_R$ – мощность поглощенной дозы, Гр/с.

Формула (3.2) преобразуется в:

$$\dot{D} \cong \int \Phi(E) k(E) dE \quad (3.6)$$

где $\Phi(E)$ – распределение плотности потока нейтронов, нейтр./см²·с;

$k(E)$ – нейтронный керма-фактор, Гр·см²/нейтр. [37].

Воспользуемся следующими приближениями:

– вынужденным делением делящихся нуклидов в ОЯТ пренебрегаем по причине того, что $k_{эф}$ в таком случае сравнительно мал;

– считаем, что нейтроны СД и (α , n) не замедляются и не поглощаются при прохождении объема таблетки;

– энергетический спектр нейтронов внутри топливной таблетки равен таковому на её поверхности.

Тогда плотность потока нейтронов можно вычислить по формуле:

$$\Phi(E) = \frac{Y(E)}{S_{\text{табл}}}, \quad (3.7)$$

где $Y(E)$ – энергетическое распределение выхода нейтронов, нейтр./с,

$S_{\text{табл}}$ – площадь поперечного сечения топливной таблетки, см².

Площадь сечения топливной таблетки вычисляется по формуле:

$$S_{\text{табл}} = \pi R_{\text{табл}}^2 \quad (3.8)$$

где $R_{\text{табл}}$ – радиус топливной таблетки, см.

Согласно рекомендациям МКРЗ 2007 года, взвешивающий коэффициент нейтронного излучения определяется по следующим формулам [36]:

$$w_R = 2,5 + 18,2 \cdot \exp\left(-\frac{\ln^2(E)}{6}\right), E < 1 \text{ МэВ};$$

$$w_R = 5 + 17,0 \cdot \exp\left(-\frac{\ln^2(2E)}{6}\right), 1 \text{ МэВ} < E < 50 \text{ МэВ}; \quad (3.9)$$

$$w_R = 2,5 + 3,25 \cdot \exp\left(-\frac{\ln^2(0,04 \cdot E)}{6}\right), E > 50 \text{ МэВ}.$$

3.4.1 Построение нейтронных спектров по формуле Уатта

В таблицы 3.21-3.24 сведены энергетические характеристики нейтронных спектров, полученных с помощью SOURCES-4C.

Таблица 3.21 – Средняя энергия суммарного спектра нейтронов, МэВ

Состав	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	1,735	2,131	2,118	2,112	2,112	2,112	2,113
№ 2	1,735	2,131	2,117	2,112	2,112	2,112	2,113
№ 3	1,805	2,137	2,120	2,113	2,113	2,113	2,114

Таблица 3.22 – Средняя энергия спектра СД-нейтронов, МэВ

Состав	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	1,689	2,104	2,107	2,108	2,108	2,107	2,107
№ 2	1,689	2,104	2,107	2,108	2,108	2,107	2,107
№ 3	1,760	2,103	2,107	2,108	2,108	2,108	2,108

Таблица 3.23 – Средняя энергия спектра (α, n)-нейтронов, МэВ

Состав	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	2,161	2,551	2,510	2,433	2,420	2,414	2,406
№ 2	2,161	2,551	2,510	2,433	2,421	2,415	2,407
№ 3	2,375	2,554	2,517	2,432	2,418	2,414	2,407

Таблица 3.24 – Наиболее вероятная энергия спектра (α, n)-нейтронов, МэВ

Состав	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	2,375	2,875	2,625	2,625	2,625	2,625	2,625
№ 2	2,375	2,875	2,625	2,625	2,625	2,625	2,625
№ 3	2,375	2,875	2,625	2,625	2,625	2,625	2,625

Наиболее вероятная энергия суммарного спектра и спектра СД-нейтронов во всех случаях равна 0,875 МэВ.

Хоть значения средней энергии спектров вычислены достаточно точно, значения наиболее вероятной энергии не вполне соответствуют действительности из-за использованного при расчете в SOURCES-4C группового приближения энергий нейтронов. В данном случае рассчитанное значение является средней энергией наиболее вероятной группы в спектре.

Из-за группового приближения также невозможно достроить спектр до значения энергии нейтронов равного нулю по причине того, что все точки на графике берутся для средней энергии каждой группы. Следовательно, нельзя оценить дозовую нагрузку в случае медленных нейтронов ($E < 0,1$ МэВ).

Кроме того, максимальная энергия спектра СД-нейтронов и, соответственно, суммарного спектра больше 12 МэВ, что также видно на графиках. Для более точного расчёта необходимы данные о выходе нейтронов с энергией до 20 МэВ согласно формуле (3.2).

Все вышеперечисленные проблемы можно решить, построив новые графики спектров по формуле Уатта [39]:

$$Y(E) = C \exp(-E) \operatorname{sh}(\sqrt{2E}) f(E), \quad (3.10)$$

где C – коэффициент нормировки;

$f(E)$ – поправочный множитель.

Поправочный множитель в формуле (3.10) равен:

$$f(E) = \begin{cases} 0,913 + 0,75E & \text{при } 0,01 \text{ МэВ} < E < 0,25 \text{ МэВ;} \\ 0,944 + 0,06E^{-0,608} & \text{при } 0,25 \text{ МэВ} < E < 10 \text{ МэВ;} \\ 2,94 \exp(-11,3/E) & \text{при } 10 \text{ МэВ} < E < 18 \text{ МэВ.} \end{cases} \quad (3.11)$$

Формула (3.10) является аппроксимирующей функцией спектра мгновенных нейтронов деления – спектра Уатта [39].

Ввиду малого вклада (α, n) -реакции в суммарный спектр нейтронов и близких значений средней энергии к таковым для спектра СД-нейтронов, примем, что все нейтроны образуются в результате СД, т. е. имеют спектр, близкий к спектру Уатта. Для построения спектров по формуле (3.10) воспользуемся значениями суммарного интегрального выхода нейтронов.

В качестве примера на рисунке 3.20 представлен спектр Уатта нейтронного излучения топлива № 1.

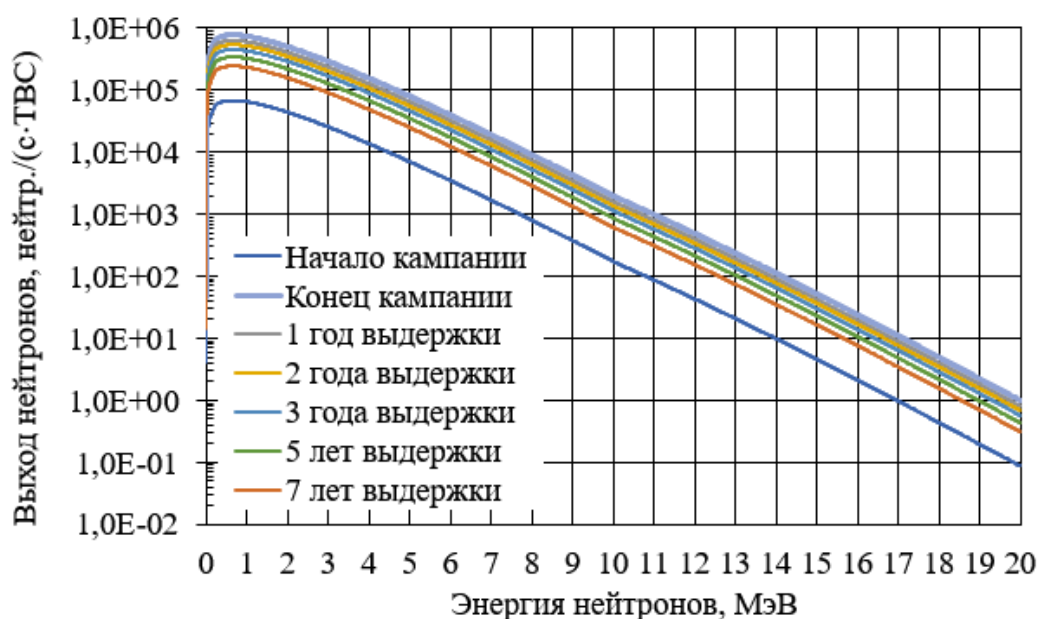


Рисунок 3.20 – Спектр Уатта нейтронного излучения топлива № 1

3.4.2 Аппроксимация нейтронных спектров

Спектр Уатта описывает спектр нейтронного излучения свежего топлива не вполне корректно, так как источником в свежем топливе в основном является ^{238}U . Спектр нейтронов спонтанного деления для U^{238} падает гораздо быстрее, чем для ^{244}Cm , в случае которого пользуются спектром Уатта.

Кроме того, в предыдущем пункте работы было принято приближение, что все нейтроны рождаются в результате спонтанного деления, т. е. пренебрегли наличием (α, n) -реакции.

Для того, чтобы решить данные проблемы, воспользуемся аппроксимацией с помощью Origin 7.0 данных, полученных в SOURCES-4C. Так как спектр нейтронов спонтанного деления хорошо описывается спектров

Уатта во всех случаях, за исключением свежего топлива, то необходимо аппроксимировать только спектры (α , n)-нейтронов и спектр СД-нейтронов свежего топлива. Аппроксимирующей функцией в данном случае является полином 9-й степени, описывающийся общей формулой:

$$\log(Y(E)) = A + B_1 \cdot E + B_2 \cdot E^2 + B_3 \cdot E^3 + B_4 \cdot E^4 + B_5 \cdot E^5 + B_6 \cdot E^6 + B_7 \cdot E^7 + B_8 \cdot E^8 + B_9 \cdot E^9, \quad (3.12)$$

где $Y(E)$ – выход нейтронов, нейтр./($c \cdot TBC$);

E – энергия нейтронов, МэВ;

$A, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9$ – коэффициенты полинома.

Логарифм в формуле (3.12) необходим, так как спектры представлены в полулогарифмическом масштабе для повышения точности аппроксимации.

Для аппроксимации (α , n)-спектров использовались данные по всему рассмотренному диапазону энергий.

В случае спектра СД-нейтронов до наиболее вероятной энергии, равной 0,66 МэВ, использовались данные, полученные по формуле Уатта: для построения спектра использовалось значение интегрального выхода СД-нейтронов.

После данной энергии значение выхода нейтронов монотонно убывает, что позволяет проводить более точную аппроксимацию, нежели при рассмотрении всего спектра. Аппроксимация достаточно точна лишь до энергии 8 МэВ, далее была задействована экстраполяция полученных значений до энергии 20 МэВ.

Коэффициент детерминации R^2 при аппроксимации полиномом (3.12) в случае спектра СД-нейтронов свежего топлива в среднем составляет 0,9936, а для (α , n)-спектров – 0,9984. Следовательно, аппроксимация проведена с высокой точностью.

В приложении Е приведены коэффициенты аппроксимирующих полиномов спектра СД-нейтронов свежего топлива и спектров (α , n)-нейтронов в случае различных топливных составов.

В дальнейшем для нахождения мощности дозы от суммарного нейтронного излучения используется суммарное значение мощностей дозы излучения СД- и (α , n)-нейтронов. В случае спектров СД-нейтронов используются данные, полученные по формуле Уатта, за исключением свежего топлива, случай с которым аппроксимируется отдельным полиномом.

3.4.3 Сравнение результатов расчёта мощности дозы

В таблицах 3.25-3.27 приведены значения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения ТВС с различным топливным составом, полученные тремя методами. Расчёт № 1 представляет из себя прямое использование значений выхода нейтронов, полученных в SOURCES-4C. В расчёте № 2 используются значения, полученные по формуле Уатта. В расчёте № 3 используется аппроксимация спектра СД-нейтронов свежего топлива и (α , n)-спектров, а спектры СД-нейтронов ОЯТ соответствуют спектру Уатта.

Таблица 3.25 – Мощность дозы излучения топлива № 1, Зв/(ч·ТВС)

Расчёт	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	1,62	23,29	18,88	16,14	13,45	10,21	7,31
№ 2	1,41	19,68	16,02	13,71	11,42	8,67	6,20
№ 3	1,35	19,47	15,95	13,68	11,40	8,64	6,18

Таблица 3.26 – Мощность дозы излучения топлива № 2, Зв/(ч·ТВС)

Расчёт	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	1,62	24,34	19,76	16,93	14,11	10,65	7,56
№ 2	1,41	20,57	16,76	14,38	11,98	9,04	6,42
№ 3	1,35	20,34	16,69	14,35	11,95	9,02	6,40

Таблица 3.27 – Мощность дозы излучения топлива № 3, Зв/(ч·ТВС)

Расчёт	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	1,75	81,03	61,11	51,37	41,60	29,61	18,89
№ 2	1,53	68,39	51,79	43,62	35,32	25,14	16,04
№ 3	1,47	67,67	51,58	43,54	35,25	25,07	15,98

Для того, чтобы оценить мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения топливной таблетки, нужно рассчитать количество таблеток в ТВС:

$$n_{\text{табл.}} = n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \frac{h_{\text{топл.}}}{h_{\text{табл.}}}, \quad (3.13)$$

где $n_{\text{ТВЭЛ}}$ – количество ТВЭЛОВ в ТВС, шт.;

$h_{\text{топл.}}$ – высота топливного столба, мм;

$h_{\text{табл.}}$ – высота топливной таблетки, мм.

Подставив известные значения в формулу (3.13), получим:

$$n_{\text{табл.}} = 312 \cdot \frac{3730}{10} = 116376 \text{ шт.}$$

В таблицах 3.28-3.29 приведены значения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения топливных таблеток с различным составом.

Таблица 3.28 – Мощность дозы излучения топлива № 1, мкЗв/(ч·табл.)

Расчёт	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	13,89	200,13	162,26	138,68	115,58	87,73	62,78
№ 2	12,16	169,14	137,61	117,78	98,16	74,49	53,30
№ 3	11,62	167,29	137,02	117,52	97,92	74,27	53,10

Таблица 3.29 – Мощность дозы излучения топлива № 2, мкЗв/(ч·табл.)

Расчёт	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	13,88	209,14	169,78	145,46	121,21	91,51	65,00
№ 2	12,15	176,77	144,01	123,54	102,94	77,70	55,18
№ 3	11,62	174,80	143,38	123,27	102,69	77,47	54,97

Таблица 3.30 – Мощность дозы излучения топлива № 3, мкЗв/(ч·табл.)

Расчёт	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 1	15,04	696,31	525,13	441,43	357,48	254,44	162,36
№ 2	13,12	587,69	445,07	374,82	303,54	216,02	137,80
№ 3	12,62	581,47	443,21	374,12	302,92	215,45	137,30

Корректность проведённого расчёта можно проверить, сравнив мощность дозы нейтронного излучения топливной таблетки с фоновым

значением. Радиационный фон в помещениях производственных зданий и сооружений не должен превышать 0,6 мкЗв/ч [40]. Мощность дозы нейтронного излучения свежей топливной таблетки обычно не превышает 20-кратного фоновое значения. Наиболее точный расчёт № 3 показывает, что полученные значения попадают в обозначенный диапазон. Следовательно, расчёт мощности дозы можно считать проведённым верно.

В таблице 3.31 приведены значения относительного изменения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения при использовании ТВС с топливом другого состава по отношению к таковой для случая ТВС с топливом № 1. В данном случае и в дальнейшем используются значения, полученные по расчёту № 3.

Таблица 3.31 – Относительное изменение дозовой нагрузки ТВС

Топливо	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
№ 2	1,00	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04
№ 3	1,09	3,48	3,23	3,18	3,09	2,90	2,59

Из таблицы 3.31 видно, что при уменьшении обогащения топлива увеличивается нейтронная составляющая дозовой нагрузки вследствие большего выхода нейтронов ОЯТ.

Использование модифицированного топлива с AmO_2 вместо штатного практически не изменяет радиационную обстановку на стадиях ЯТЦ до загрузки топлива в реактор. Тем не менее, ТВС с таким топливом на конец кампании имеет повышенную в 3,48 раз нейтронную составляющую дозовой нагрузки по сравнению со штатной ТВС, что необходимо учитывать при обращении с ОЯТ. Такое топливо также может требовать большего времени выдержки, так как из таблиц 30-32 видно, что мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения отработавшей ТВС с модифицированным топливом после 7 лет выдержки становится примерно равной таковой в случае штатной ТВС после 1 года выдержки.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

В данном разделе представляется описание разработки проекта по определению нейтронно-физических и радиационных характеристик штатного и модифицированного топлива реактора ВВЭР.

Штатное ядерное топливо имеет ряд проблем, среди которых низкая радиационная и термическая стойкость, ограничивающая производительность и безопасность реактора. Для того, чтобы решить данные проблемы, ведутся исследования по изучению свойств модифицированного топлива, которое, однако, из-за своего состава может осложнить радиационную обстановку.

Поэтому перед внедрением такого топлива в ядерно-топливный цикл, необходимо провести расчёт радиационных характеристик как свежего, так и отработавшего ядерного топлива (далее – ОЯТ), результаты которого могут подтвердить или опровергнуть целесообразность его использования с учетом актуальных норм радиационной безопасности.

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Использование модифицированного ядерного топлива в перспективе может повысить эффективность работы ядерного реактора, поэтому в качестве основных потребителей выбраны атомные электростанции (далее – АЭС), так как на них ядерные реакторы используются для выработки тепловой энергии с последующей её конвертацией в электрическую.

Построена карта сегментирования рынка ядерных реакторов, использующихся на АЭС, в России на 2023 год [41], приведенная в таблице 4.1. Топливная компания Росатома «ТВЭЛ» является монопольным

поставщиком ядерного топлива на все российские ядерные реакторы, а сама Госкорпорация «Росатом» занимает весь рынок ядерных реакторов России.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка ядерных реакторов в России

Кол-во	Тип ядерного реактора						
	Реакторы с водой под давлением			Канальные кипящие реакторы		Реакторы на быстрых нейтронах	
	ВВЭР-1000	ВВЭР-1200	ВВЭР-440	РБМК-1000	ЭГП-6	БН-600	БН-800
10-15							
6-10							
1-5							

Из таблицы 4.1 видно, что на российском рынке преобладают реакторы типа ВВЭР-1000. Более того, так как на ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 зачастую используется топливо с близкими или идентичными параметрами, можно рассматривать данные сегменты рынка вместе в рамках настоящей работы. Следовательно, так как повышение эффективности работы реакторов ВВЭР является важным для отечественной энергетики, результаты исследования модифицированного топлива являются востребованными.

Кроме того, целевым рынком, помимо АЭС, являются научно-исследовательские институты, в которых, на основании расчётов в рамках настоящей работы, могут продолжить изучение свойств модифицированного топлива с помощью экспериментов.

Информация о заинтересованных сторонах проекта сведена в таблицу 4.2, цель проекта и критерии достижения целей приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.2 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Атомные электростанции с реакторами типа ВВЭР-1000, ВВЭР-1200	Использование модифицированного топлива для повышения эффективности работы реактора
Научно-исследовательские институты	Использование результатов расчёта для проведения экспериментов с модифицированным топливом

Таблица 4.3 – Цель и результаты проекта

Цель проекта:	Определение нейтронно-физических и радиационных характеристик штатного и модифицированного топлива ВВЭР с повышенной глубиной выгорания
Ожидаемые результаты проекта:	Определены свойства модифицированного топлива, рассчитаны и сравнены между собой значения дозовой нагрузки нейтронного излучения штатного и модифицированного ядерного топлива
Критерии приёмки результатов проекта:	Полученные значения теоретически обоснованы, точность расчёта является высокой

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений.

Позицию разработки и конкурентов будем оценивать по десятибалльной шкале, с шагом 1 балл, где 1 – наиболее слабая позиция, а 10 – наиболее сильная. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы) – это важность фактора (по пятибалльной шкале), деленая на сумму важностей всех факторов;

B_i – балл i -го показателя.

Штатное топливо – это диоксид урана с обогащением 3–5 %, использующийся на ядерных реакторах типа ВВЭР для выработки энергии. Модифицированное топливо – диоксид урана с добавлением какой-либо легирующей добавки, улучшающей свойства ядерного топлива. В рамках данной работы изучаются свойства топлива с америцием, который является выгорающим поглотителем и потому используются для компенсации начальной избыточной реактивности реактора. Его использование позволяет обходиться меньшими объемами борной кислоты, также использующейся для

компенсации реактивности и, как следствие, это ведёт к меньшим объемам радиоактивных отходов при эксплуатации ядерного реактора.

Оценочная карта для сравнения разработок приведена в таблице 4.4. Здесь индекс «ф» присвоен разработке модифицированного топлива, индекс «к» присвоен конкурирующей разработке штатного топлива.

Таблица 4.4 – Оценочная карта для сравнения разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _к	К _ф	К _к
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Энергоэкономичность	0,05	10	7	0,50	0,35
Потребность в материальных ресурсах	0,05	7	9	0,35	0,45
Надежность	0,1	8	7	0,80	0,70
Безопасность	0,3	10	7	3,00	2,10
Дозовая нагрузка ОЯТ	0,1	4	9	0,40	0,90
Объем радиоактивных отходов	0,1	10	5	1,00	0,50
Экономические критерии оценки эффективности					
Цена	0,2	6	8	1,20	1,60
Срок эксплуатации	0,05	8	8	0,40	0,40
Сложность изготовления	0,05	7	8	0,35	0,40
Итого	1	-	-	8,00	7,40

Полученные данные в таблице 4.4 позволяют говорить о том, что исследование целесообразно, поскольку использование модифицированного ядерного топлива увеличивает эффективность работы реактора даже с учетом повышенной дозовой нагрузки ОЯТ и стоимости, что обеспечивает его конкурентное преимущество.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы).

SWOT-анализ проводится в несколько этапов. Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде [42]. Матрица SWOT представлена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Матрица SWOT

Сильные стороны	Возможности
С1. Новаторство проекта С2. Модифицированное ядерное топливо с америцием улучшает теплопроводность топлива С3. Америций является выгорающим поглотителем в топливе, поэтому требуется меньше борной кислоты для компенсации реактивности	В1. Публикация статей в научно-технических журналах В2. Применение результатов исследования в целях улучшения работы реакторов ВВЭР В3. Большое количество тематических научных конференций
Слабые стороны	Угрозы
Сл1. Введение америция увеличивает стоимость топлива Сл2. Отработавшее модифицированное ядерное топливо имеет повышенную дозовую нагрузку Сл3. Модифицированное топливо имеет более сложный технологический процесс изготовления	У1. Потеря интереса к ядерной энергетике, переход на другие источники энергии У2. Вывод из эксплуатации ВВЭР, переход на другой тип ядерных реакторов У3. Сокращение финансирования ядерных реакторов со стороны государства

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Каждый фактор помечается знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком

«–» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения «+» или «–». Интерактивные матрицы представлены в таблицах 4.6 – 4.9.

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица №1

Сильные стороны				
Возможности		C1	C2	C3
	B1	+	+	+
	B2	–	+	+
	B3	+	+	+

Таблица 4.7 – Интерактивная матрица №2

Сильные стороны				
Угрозы		C1	C2	C3
	У1	–	–	–
	У2	–	–	–
	У3	–	–	–

Таблица 4.8 – Интерактивная матрица №3

Слабые стороны				
Возможности		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	–	–	–
	B2	+	+	+
	B3	–	–	–

Таблица 4.9 – Интерактивная матрица №4

Слабые стороны				
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	–	–	–
	У2	–	–	–
	У3	+	+	+

В рамках третьего этапа составляется итоговая матрица SWOT-анализа, которая представлена в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – SWOT-анализ

	Сильные стороны: С1. Новаторство проекта С2. Модифицированное ядерное топливо с америцием улучшает теплопроводность топлива С3. Америций является выгорающим поглотителем в топливе, поэтому требуется меньше борной кислоты для компенсации реактивности	Слабые стороны: Сл1. Введение америция увеличивает стоимость топлива Сл2. Отработавшее модифицированное ядерное топливо имеет повышенную дозовую нагрузку Сл3. Модифицированное топливо имеет более сложный технологический процесс изготовления
--	--	---

Продолжение таблицы 4.10

Возможности: В1. Публикация статей в научно-технических журналах В2. Применение результатов исследования в целях улучшения работы реакторов ВВЭР В3. Большое количество тематических научных конференций	Данный проект является довольно-таки новаторским, необходимо его обсуждение на конференциях, а также продвижение в виде статей в научно-технических журналах. После этого можно попробовать применить результаты на практике в целях улучшения работы реакторов ВВЭР.	Слабые стороны проекта не мешают его обсуждению на конференциях и публикациям в журналах, но их необходимо учитывать при практическом применении. Необходимо, чтобы увеличение цены топлива компенсировалось повышением эффективности реактора. Кроме того, необходима более серьезная защита при обращении с ОЯТ.
Угрозы: У1. Потеря интереса к ядерной энергетике, переход на другие источники энергии У2. Вывод из эксплуатации ВВЭР, переход на другой тип ядерных реакторов У3. Сокращение финансирования ядерных реакторов со стороны государства	Наступление сценариев данных угроз маловероятно, а если они и осуществляются, то проект так или иначе потеряет смысл. ВВЭР активно используются и будут функционировать в течении долгого времени. Реакторы такого типа построены в России и за рубежом, что означает множество потенциальных потребителей.	Потеря интереса к ядерной энергетике или вывод из эксплуатации ВВЭР маловероятны, а если это и произойдет, то слабости проекта уже не будут играть роли. Но вот при сокращении финансирования реакторов проект невозможно будет применить на практике, так как модифицированное топливо является более дорогим.

На основе результатов SWOT-анализа можно сделать вывод о том, что в угрозы для проекта минимальны. Слабые стороны проекта по отношению к различным возможностям либо не влияют на них, либо компенсируются сильными сторонами.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований [42].

Перечень этапов, работ и распределение исполнителей приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме ядерного топлива ВВЭР	Студент
	3	Выбор направления исследований численной спектроскопии	Руководитель, студент
	4	Календарное планирование работ по теме ядерного топлива ВВЭР	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Нейтронно-физический расчёт ТВС и расчёт выгорания в WIMS-D5B	Студент
	6	Анализ источников альфа- и нейтронного излучения топлива	Студент
	7	Расчёт выходов нейтронов и их энергетических спектров в SOURCES-4C	Студент
	8	Расчёт радиационных характеристик нейтронного излучения топлива	Студент
	9	Разработка чертежей	Студент
	10	Оценивание правильности полученных характеристик путём сравнения результатов для штатного топлива с экспериментальными	Руководитель, студент
Оформление отчета по НИР	11	Составление пояснительной записки	Студент
	12	Оформление пояснительной записки согласно требованиям	Руководитель, студент

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаях образуют основную часть стоимости разработки. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов [43]. Для определения ожидаемого значения трудоемкости t_{oji} используется формула:

$$t_{oji} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (4.2)$$

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

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка), чел.-дн.;

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{oji}}{Ч_i}, \quad (4.3)$$

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

t_{oji} – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

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

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Важным является составление календарного плана выполнения исследовательских работ в виде диаграммы Ганта. Это горизонтальный ленточный график, в котором работы по теме представляются отрезками времени, показывающими начало и окончание этапов.

Чтобы построить диаграмму, необходимо перевести длительность выполнения этапов работы из рабочих дней в календарные. Для этого нужно воспользоваться формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.4)$$

где T_{ki} – продолжительность одной работы, кал. дн.;

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

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

Значения, полученные по формуле (4.4), необходимо округлить до целого числа.

Коэффициент календарности можно определить следующим образом:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})}, \quad (4.5)$$

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

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

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

На 2023 год коэффициент календарности по формуле (4.5) составляет:

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

Временные показатели осуществления комплекса работ в рабочих и календарных днях представлены в таблице 4.12, где студент обозначен С, а руководитель – Р.

Таблица 4.12 – Временные показатели осуществления комплекса работ

Название работы	Трудоемкость работ						T_{pi} , раб. дн.		T_{ki} , кал. дн.	
	t_{mini} , чел.-дн.		t_{maxi} , чел.-дн.		t_{oji} , чел.-дн.					
	С	Р	С	Р	С	Р	С	Р	С	Р
Составление и утверждение технического задания	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0	1
Подбор и изучение материалов по теме ядерного топлива ВВЭР	10	0	15	0	12	0	12	0	15	0
Выбор направления исследований численной спектроскопии	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1

Продолжение таблицы 4.12

Название работы	Трудоемкость работ						T_{pi} , раб. дн.		T_{ki} , кал. дн.	
	t_{mini} , чел.-дн.		t_{maxi} , чел.-дн.		t_{oji} , чел.-дн.					
	С	Р	С	Р	С	Р	С	Р	С	Р
Календарное планирование работ по теме ядерного топлива ВВЭР	0	0,7	0	0,7	0	0,7	0	0,7	0	1
Нейтронно-физический расчёт ТВС и расчёт выгорания в WIMS-D5B	12	0	15	0	13	0	13	0	16	0
Анализ источников альфа- и нейтронного излучения топлива	3	0	5	0	4	0	4	0	5	0
Расчёт выходов нейтронов и их энергетических спектров в SOURCES-4C	17	0	25	0	20	0	20	0	24	0
Расчёт радиационных характеристик нейтронного излучения топлива	10	0	15	0	12	0	12	0	15	0
Разработка чертежей	2,5	0	2,5	0	2,5	0	2,5	0	3	0
Оценивание правильности полученных характеристик путём сравнения результатов для штатного топлива с экспериментальными	2	1	4	2	2,8	1,4	1,4	0,7	2	1
Составление пояснительной записки	17	0	24	0	20	0	20	0	25	0
Оформление пояснительной записки согласно требованиям	3	1	3	1	3	1	1,5	0,5	2	1
Итого:							88	3	108	5

На основе данных из таблицы 4.12 строится календарный план-график для максимального по длительности исполнения работ в рамках проекта с разбивкой по месяцам и декадам за период времени работы. Календарный план-график проведения исследования представлен в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Календарный план-график проведения исследования

№	Вид работ	Исполнители	$T_{\text{кл}}$, кал. дн.	Продолжительность работ											
				февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	Р	1												
2	Подбор и изучение материалов по теме ядерного топлива ВВЭР	С	15												
3	Выбор направления исследований численной спектроскопии	Р, С	1												
4	Календарное планирование работ по теме ядерного топлива ВВЭР	Р	1												
5	Нейтронно-физический расчёт ТВС и расчёт выгорания в WIMS-D5B	С	16												
6	Анализ источников альфа- и нейтронного излучения топлива	С	5												
7	Расчёт выходов нейтронов и их энергетических спектров в SOURCES-4C	С	24												
8	Расчёт радиационных характеристик нейтронного излучения топлива	С	15												
9	Разработка чертежей	С	3												
10	Оценивание правильности полученных характеристик путём сравнения результатов для штатного топлива с экспериментальными	Р, С	2												
11	Составление пояснительной записки	С	25												
12	Оформление пояснительной записки согласно требованиям	Р, С	2												

 – студент;  – руководитель.

4.3 Бюджет проекта

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

1. материальные затраты;
2. затраты на специальное оборудование для проведения работ;
3. основная заработная плата исполнителей;
4. дополнительная заработная плата исполнителей;
5. отчисления во внебюджетные фонды;
6. контрагентские расходы;
7. накладные расходы;

4.3.1 Материальные затраты

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_{\text{м}} = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{\text{расхи}} \quad (4.6)$$

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

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

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

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

Расчёт материальных затрат представлен в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Тетрадь	шт.	1	75	75
2. Карандаш	шт.	1	8	8
3. Ручка шариковая	шт.	1	25	25
4. Резинка стирательная	шт.	1	12	12
Итого по статье: 120 руб.				

4.3.2 Затраты на специальное оборудование

Для данной работы оборудование специально не покупалось, следовательно, необходимо провести расчет амортизации использованного оборудования. Оборудование включает в себя один персональный компьютер стоимостью 40000 рублей, срок службы которого составляет 8 лет.

Ежегодную сумму амортизационных отчислений равна:

$$A = \frac{H_A \cdot C \cdot t}{365 \cdot 100 \%}, \quad (4.7)$$

где A – ежегодная сумма амортизационных отчислений;

C – первоначальная стоимость оборудования;

t – время использования оборудования.

Норма амортизационных отчислений в формуле (2) вычисляется как:

$$H_A = \frac{100}{T}, \quad (4.8)$$

где T – срок службы, лет.

Результаты расчета амортизации представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Затраты на специальное оборудование

Наименование оборудования	Кол-во единиц	Стоимость оборудования, руб.	Срок службы, лет	Время использования, дней	Сумма амортизации, руб.
Персональный компьютер	1	40000	8	27	370
Итого по статье: 370 руб.					

4.3.3 Основная заработная плата

Данный пункт содержит заработную плату работников, которые напрямую связаны с реализацией проекта. Статья включает заработную плату по окладу, дополнительную заработную плату, а также премии и доплаты.

Заработная плата исполнителя проекта рассчитывается по формуле:

$$З_{ЗП} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (4.9)$$

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

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата исполнителя проекта:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (4.10)$$

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

$T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_M \cdot M}{F_d}, \quad (4.11)$$

где $З_M$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн., величина рассчитана в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Баланс рабочего времени в 2023 году

Календарное число дней	365
Количество нерабочих дней	
– выходные дни	52
– праздничные дни	14
Потери рабочего времени	
– отпуск	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	251

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$З_M = З_б \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.12)$$

где $З_б$ – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент;

k_d – коэффициент доплат и надбавок;

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

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$З_б$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	$З_M$, руб	$З_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$З_{осн}$, руб.
Лаборант	17890	0,3	0,3	1,3	37211	1542	88	135680
Руководитель (доцент ТПУ)	36110	–	–	1,3	46943	1945	3	5835
Итого $З_{осн}$, руб.								141515

4.3.4 Дополнительная заработная плата

Затраты по дополнительной заработной плате учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от

нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчёт дополнительной заработной платы ведется по формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (4.13)$$

где $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

$З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

Расчёт дополнительной заработной платы приведён в таблице 4.18

Таблица 4.18 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнитель	Руководитель	Студент
Основная заработная плата, руб.	5835	135680
Коэффициент дополнительной зарплаты	0,12	
Дополнительная заработная плата, руб.	700	16282
Итого по статье: 16982 руб.		
Итоговые затраты по оплате труда: 158497 руб.		

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Данная статья отражает обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам федеральным органам от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется как:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (4.14)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

В 2023 году вместо отдельных тарифов взносов в ФСС, ФОМС, ПФР оплату необходимо выполнять по единому тарифу в Социальный фонд России, который составляет 30 %.

Расчёт затрат по данной статье представлен в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Студент
Основная заработная плата, руб.	5835	135680
Дополнительная заработная плата, руб.	700	16282
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,30	
Отчисления во внебюджетные фонды	1961	45588
Итого по статье: 47549 руб.		

4.3.6 Контрагентские расходы

В данной статье рассматривают работы, выполненные сторонними организациями и предприятиями. Для данного проекта в эту статью расходов отнесем использование сети Интернет. Результаты расчета по данной статье приведены в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Контрагентские расходы

Наименование	Время использования, мес.	Цена за единицу, руб.	Расходы, руб.
Доступ в интернет	3	350	1050
Итого по статье: 1050 руб.			

4.3.7 Накладные расходы

В этот пункт включены расходы на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на проект и не попавшие в предыдущие статьи расходов.

В данной статье расходов рассматриваются затраты на электроэнергию, потребляемую оборудованием, которые рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{эл}} = T_{\text{эл}} \cdot P \cdot t_{\text{об}}, \quad (4.15)$$

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

P – мощность оборудования, кВт;

$t_{\text{об}}$ – время использования оборудования, ч.

Расчёт затрат на электроэнергию приведен в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Расчет затрат на электроэнергию

Оборудование	Тариф на электроэнергию, руб. за 1 кВт·ч	Мощность оборудования, кВт	Время использования, ч	Затраты, руб.
Персональный компьютер	5,8	0,08	648	301

Кроме того, пакет услуг печати настоящей работы обошелся в 480 рублей. Следовательно, суммарные затраты по статье накладных расходов составляют 781 руб.

4.3.8 Формирование бюджета затрат проекта

Рассчитанная величина затрат является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Расчёт бюджета затрат проекта приведён в таблице 4.22.

Таблица 4.22 – Бюджет затрат проекта

№ п/п	Наименование статьи	Сумма, руб.
1	Материальные затраты	120
2	Затраты на специальное оборудование для проведения работ	370
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	141515
4	Затраты на дополнительной заработной плате исполнителей темы	16982
5	Отчисления во внебюджетные фонды	47549
6	Контрагентские расходы	1050
7	Накладные расходы	781
Бюджет затрат проекта: 208367 руб.		

Таким образом, плановая стоимость проекта составляет 208367 рублей. Основные затраты приходятся на заработную плату исполнителей проекта.

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.16)$$

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

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

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

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

В качестве альтернативного варианта исполнения выбран аналогичный проект с использованием программного обеспечения PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System). Данная программа позволяет оценить нейтронно-физические и радиационные характеристики топлива, как и при совместном использовании WIMS-D5B и SOURCES-4C в настоящей работе.

Тем не менее, в настоящее время PHITS не распространяется по бесплатной студенческой лицензии, в отличие от WIMS-D5B и SOURCES-4C,

поэтому в таком случае общая стоимость проекта возрастает на стоимость лицензии RHITS, которая составляет порядка 2000000 рублей. Остальные затраты остаются неизменными, так как время расчёта и требования к оборудованию одинаковы.

Тогда, рассчитывая значение интегрального финансового показателя учтем, что исп.1 – использование программ WIMS-D5B и SOURCES-4C, исп.2 – использование программы RHITS:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.1}} = \frac{207671}{2207671} = 0,094; \quad I_{\text{фин}}^{\text{исп.2}} = \frac{2207671}{2207671} = 1.$$

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

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i, \quad (4.17)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 4.23, где исп.1 – использование программ WIMS-D5B и SOURCES-4C, исп.2 – использование программы RHITS.

Таблица 4.23 – Оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Оценка исп.1	Оценка исп.2
Критерии			
Точность расчёта	0,25	4	5
Удобство в использовании	0,1	4	2

Продолжение таблицы 4.23

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Оценка исп.1	Оценка исп.2
Универсальность	0,1	3	5
Время расчёта	0,15	4	4
Требования к оборудованию	0,15	4	4
Вероятность пользовательской ошибки	0,25	5	3
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4,15	3,90

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп}i} = \frac{I_{\text{pi}}}{I_{\text{фин}}}. \quad (4.18)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта определяется как:

$$\Theta_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}}. \quad (4.19)$$

Расчёт сравнительной эффективности проекта сведён в таблицу 4.24.

Таблица 4.24 – Сравнительная эффективность проекта

Показатели	Исп. 1	Исп. 2
Интегральный финансовый показатель разработки	0,094	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,15	3,90
Интегральный показатель эффективности	44,12	3,90
Сравнительная эффективность проекта	11,31	

Как видно из таблицы 4.24, совместное использование программ WIMS-D5B и SOURCES-4C вместо PHITS является наиболее целесообразным решением для проведения расчётов в рамках настоящей работы.

5 Социальная ответственность

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.

В работе описывается процесс создания модели тепловыделяющей сборки ядерного реактора и расчёт радиационных характеристик ядерного топлива. Непосредственно студентом работа проводилась с использованием ЭВМ в аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ.

Так как исследование производилось с помощью ЭВМ, то целью данного раздела является анализ соблюдения санитарных норм и правил в процессе работы над проектом с применением компьютера. Рассматриваются меры необходимые для защиты от негативного воздействия среды. Исследуются вредные и опасные факторы, которые негативно влияют на здоровье человека при работе с соответствующими элементами. Изучаются способы снижения воздействия этих факторов до допустимых пределов. Кроме того, рассматриваются возможные аварийные и чрезвычайные ситуации и действия, выполняемые при их возникновении.

5.1 Производственная безопасность

Во время работы имеют место быть следующие опасные и вредные факторы, которые представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 [44])	Нормативные документы
1. Микроклимат	ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [45]; СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [46]
2. Шум	ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1) [47]
3. Освещенность	СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1) [48]

Продолжение таблицы 5.1

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 [44])	Нормативные документы
4. Электромагнитные поля	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов [49]; ГОСТ 12.1.006-84. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля [50]
5. Электробезопасность	ГОСТ Р 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность [51]; ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи [52]
6. Пожаровзрывобезопасность	ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования [53]; СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений (с Изменениями N 1, 2) [54]
7. Радиационная безопасность	СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 [55]

5.2 Микроклимат

Показателями, характеризующими микроклимат, являются [46]:

- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового излучения.

Источником возникновения отклонений вышеперечисленных параметров является: нагрев поверхностей технологического оборудования, влияние окружающей среды на рабочее помещение, неправильная проектировка и/или выбор материалов рабочего помещения, неверный режим работы вентиляции.

В целом отклонение показателей микроклимата приводит к снижению работоспособности человека, переутомляемости и риску возникновения заболеваний. Каждый из параметров микроклимата оказывает влияние на человека, а в совокупности они могут усиливать негативное влияние на

организм. Существуют определенные категории работ, каждой из которых присваиваются определённые оптимальные параметры микроклимата. Работу с ЭВМ в аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ можно категорировать как лёгкая физическая работа (категория 1б). Показатели для температуры, влажности и скорости воздуха представлены в таблице 5.2 [46].

Таблица 5.2 – Оптимальные нормы микроклиматических параметров в рабочей зоне

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м\с
Холодный	Лёгкая - 1б	21-23	40-60	Не более 0,1
Тёплый		22-24	40-60	Не более 0,1

Для поддержания данных санитарных норм достаточно иметь местный кондиционер полного кондиционирования воздуха, обеспечивающий постоянство температуры, относительной влажности, скорости движения и чистоты воздуха.

Для расчёта кратности воздухообмена вентилятора, который будет обеспечивать циркуляцию воздушных масс в помещении, воспользуемся формулой [56]:

$$W = V \cdot k = S \cdot h \cdot k, \quad (5.1)$$

где k – нормированная кратность воздухообмена,

V – объём аудитории;

S – площадь аудитории ($S = 29 \text{ м}^2$);

h – высота потолка в аудитории ($h = 3,5 \text{ м}$).

Для подвального помещения $k = 12$ [56]. Подставляя данные в формулу (5.1), получим характеристику кратности воздухообмена вентилятора:

$$W = 29 \cdot 3,5 \cdot 12 = 1218 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таким образом, в аудиторию № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ необходимо поставить вентилятор воздуховода XL ECo250P/200/700 P 0 с производительностью 1250 м³/ч [57].

Также необходима система центрального отопления, обеспечивающая заданный уровень температуры в зимний период по нормам [58]. В зимний период в аудитории для поддержания необходимой температуры используется система водяного отопления. Эта система надежна в эксплуатации и обеспечивает возможность регулирования температуры в широких пределах. При устройстве системы вентиляции и кондиционирования воздуха в помещении аудитории необходимо соблюдать определенные требования пожарной безопасности. В зимнее время в помещении необходимо предусмотреть систему отопления. Она должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха.

По защите исследователя от действия вредного фактора отклонения показателей микроклимата создаются микроклиматические условия отоплением, обменной вентиляцией и кондиционированием воздуха согласно [45, 46, 56, 58].

Микроклимат аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ соответствует нормам [45, 46, 56, 58].

5.3 Шум

Шум возникает при работе механических и электромеханических изделий.

Для оценки шумовой обстановки допускается использовать числовую характеристику, называемую уровнем звука (измеряется в дБ). В соответствии с [59] допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях с шумным оборудованием, составляет 75 дБ. Зоны с уровнем звука 80 дБ должны быть обозначены знаками безопасности согласно [60].

В аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ основным источником шума является компьютер (система охлаждения внутри системного блока).

В соответствии со спецификацией, уровень шума блока питания компьютера составляет 5-10 дБ, уровень шума охлаждающего устройства процессора 15-20 дБ, остальные элементы охлаждения являются пассивными и их уровень шума не учитывается.

В аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ дополнительная звукоизоляция не требуется, так как предельное значение уровня шума не достигается.

Для доведения уровня шума до санитарных норм следует придерживаться следующих правил при организации труда в помещении:

- своевременно осуществлять профилактику системных блоков компьютеров путём очистки от пыли и смазывания движущихся частей охлаждающих установок;
- осуществлять замену излишне шумных комплектующих по мере необходимости.

Защита от повышенных уровней шума в аудитории № 042Б корпуса № 10 ТПУ осуществляется методами его снижения в источнике образования и на пути распространения, устройством экранов и звукопоглощающих облицовок, средствами индивидуальной защиты согласно [59].

5.4 Освещенность

Недостаточная освещенность рабочей зоны также считается одним из факторов, влияющих на работоспособность человека. Правильно подобранные источники света и их проектирование создают условия для производственного труда, корректности выполнения технологических операций, соблюдения правил и техники безопасности.

Главной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости.

Для защиты от недостаточной освещенности рабочей зоны естественное освещение является наиболее приемлемым, но не всегда его оказывается достаточно.

Внутри помещений по способу размещения светильников и распределению освещенности различают следующие системы искусственного освещения: общее и комбинированное.

При учете особенностей процесса работ на компьютере допускается применение системы общего равномерного освещения.

Общим называется освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения, как занятую оборудованием или рабочими местами, так и вспомогательную. В зависимости от расположения светильников различают равномерное и локализованное общее освещение. При общем равномерном освещении светильники располагаются в верхней зоне помещения равномерно, обеспечивая тем самым одинаковую освещенность всего помещения. Оно применяется, как правило, когда расположение рабочих зон при проектировании неизвестно либо при гибкой планировке. При общем локализованном освещении светильники размещают с учетом расположения технологического оборудования, создавая на отдельных поверхностях требуемый уровень освещения.

Для общего освещения применяются газоразрядные лампы: дневной (ЛД), холодно-белой (ЛХБ), тепло-белой (ЛТБ) и белой цветности (ЛБ).

Помещение с компьютером имеет следующие параметры:

- высота потолка в помещении: $H = 350$ см;
- расстояние светильников от перекрытия: $h_c = 35$ см;
- высота рабочей поверхности над полом: $h_{rp} = 80$ см;
- расстояние между соседними светильниками: $L = 3,6$ м;
- расстояние от крайних светильников до стены: $l = 1,1$ м.

Высота светильника над полом (высота подвеса) рассчитывается как:

$$h_{\pi} = H - h_c = 350 - 35 = 315 \text{ см.} \quad (5.2)$$

Тогда высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_{\text{н}} - h_{\text{п}} = 315 - 80 = 235 \text{ см.} \quad (5.3)$$

При освещении рабочего помещения двухламповыми светильниками ОД при одиночной установке или при непрерывных рядах из одиночных светильников в соответствии с требованиями наименьшая допустимая высота подвеса над полом составляет 3,5 м. Рассчитанная величина $h = 2,35$ м не соответствует требованиям.

Расстояние от крайних светильников до стены $l = 1,1$ м является подходящим, так как оптимальная величина равна:

$$\frac{L}{3} = \frac{3,75}{3} = 1,25 \text{ м.} \quad (5.4)$$

Интегральный критерий оптимальности расположения светильников:

$$\lambda = \frac{L}{h}. \quad (5.5)$$

Величина в формуле (5.5) составляет 1,4 при правильном расположении светильников. Рассчитаем оптимальное расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,6 = 3,64 \text{ м.} \quad (5.6)$$

Полученная величина подтверждает правильность настоящего расположения светильников, при котором $L = 3,6$ м.

Расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока:

$$\varphi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot n}, \quad (5.7)$$

где E_n – нормируемая минимальная освещенность;

S – площадь освещаемого помещения, равная 29 м²;

K_z – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника и наличие в атмосфере пыли;

Z – коэффициент неравномерности освещения;

N – число ламп в помещении, равное 6;

n – коэффициент использования светового потока, равный 0,5.

Согласно [48], при разряде зрительной работы VI: очень малой точности, $E_n = 200$ Лм. Для помещения с малым выделением пыли $K_z = 1,5$. Для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

Подставив значения в формулу (5.7), получим:

$$\varphi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot n} = \frac{200 \cdot 29 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{6 \cdot 0,5} = 3190 \text{ Лм.}$$

В соответствии с рассчитанным значением светового потока, наиболее оптимальной световой люминесцентной лампой является лампа типа OSRAM DULUX T/E 42W/830 PLUS GX24Q с электрической мощностью осветительной системы 42 Вт и световым потоком 3200 Лм [61].

Фактическое освещение аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ соответствует установленным нормам [48].

5.5 Электромагнитные поля

Основным вредным фактором при использовании ЭВМ является электромагнитное излучение от составляющих частей компьютера. Нормы вредных допустимых уровней (ВДУ) электромагнитного излучения ЭВМ, установленные в нормах [49], представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Временные допустимые уровни электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряжённость электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Экран и системные блоки ЭВМ также производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна соответствовать нормам [49, 50].

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы.

Существуют следующие способы защиты от электромагнитных полей:

- 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.

В аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ уровни электромагнитных полей соответствуют допустимым нормам [49, 50].

5.6 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электродуги, электромагнитного поля и статического электричества согласно [51, 52]. Электрический ток, проходя

через тело человека, производит тепловое, химическое и биологическое воздействие, тем самым нарушая нормальную жизнедеятельность. Работники, принимаемые для выполнения работ в электроустановках, должны иметь профессиональную подготовку, соответствующую характеру работы.

В рамках данной работы не производились контакты с открытыми источниками электрического тока. Ток, протекающий в компьютерной периферии (компьютерная мышь, клавиатура), не представляет существенной опасности для здоровья человека. Согласно классификации, аудитория № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ подходит под помещения 1 класса, в котором рабочие напряжения не превышают 1000 В [51].

5.7 Пожаровзрывобезопасность

В зависимости от характеристик веществ и материалов, находящихся в помещении, по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г и Д в соответствии с [62]. в Аудитория № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ относится к категории В, так как в нем содержатся твердые горючие вещества в холодном состоянии.

Возможные причины возгорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоках питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности.

В целях снижения риска возникновения пожара и минимизации возможного ущерба производятся профилактические мероприятия, которые подразделяются на организационно-технические, эксплуатационные и режимные. Организационно-технические мероприятия заключаются в проведении регулярных инструктажей сотрудников ответственным за пожарную безопасность, обучении сотрудников надлежащей эксплуатации оборудования и необходимым действиям в случае возникновения пожара, паспортизацию веществ, материалов и изделий в части обеспечения пожарной безопасности, изготовление и применение средств наглядной агитации по

обеспечению пожарной безопасности [53, 54]. К эксплуатационным мероприятиям относят профилактические осмотры оборудования. Мероприятия режимного характера включают установление правил организации работ и соблюдение противопожарных мер.

Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- содержание помещений в соответствии с требованиями пожарной безопасности;
- надлежащая эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электропитания, контроль нагрева оборудования);
- обучение производственного персонала правилам пожарной безопасности;
- наличие, правильное размещение и использование средств пожаротушения.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Данные огнетушители предназначены для тушения загораний различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В, горючих жидкостей. Химические и пенные огнетушители не допустимы. Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда, повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара. Согласно требованиям пожарной безопасности [53, 54], на этаже находится 2

огнетушителя ОП-3 (огнетушители переносные порошковые), лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

5.8 Радиационная безопасность

К опасным и вредным производственным факторам, связанным с повышенным уровнем ионизирующих излучений, относят следующие виды излучений [55]:

- коротковолновое электромагнитное излучение – рентгеновское излучением и гамма-излучение;
- потоки частиц: бета-частиц, альфа-частиц, нейтронов, протонов, мюонов, осколков деления и др.
- излучение, вызванное радиоактивным загрязнением (выше природного фона), в том числе загрязнением техногенными радионуклидами:
 - радиоактивное загрязнение воздуха рабочей зоны (из-за наличия радиоактивных газов, продуктов их радиоактивного распада, аэрозолей, содержащих радионуклиды);
 - радиоактивное загрязнение поверхностей и материалов производственной среды, включая средства защиты работающих и их кожные покровы.

В результате воздействия ионизирующих излучений на организм человека нарушается нормальное течение биохимических процессов и обмен веществ. В зависимости от величины поглощенной дозы излучения и от индивидуальных особенностей организма. Вызванные изменения могут быть обратимыми или необратимыми. Любой вид ионизирующего излучения вызывает биологические изменения в организме как при внешнем облучении, когда источник облучения находится вне организма, так и при внутреннем облучении, когда радиоактивные вещества попадают внутрь организма [55].

В ходе выполнения научного исследования, предполагающего теоретические расчеты с использованием компьютера, работы с источниками ионизирующего излучения не осуществлялись.

5.9 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (далее – ЧС) – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [63]. Существует два вида чрезвычайных ситуаций: техногенная и природная.

К техногенным ЧС можно отнести пожары, взрывы, диверсии, выбросы ядовитых веществ. К природным ЧС относятся природные катаклизмы.

К опасностям несчастного случая относится внезапный и неуправляемый источник энергии: двигающийся предмет, неуправляемое движение или энергия.

Рассмотрим возможные аварийные ситуации (далее – АС) и ЧС в аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ и мероприятия по их предотвращению и ликвидации последствий, представленные в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – АС и ЧС, мероприятия по их предотвращению и ликвидации последствий

№	АС и ЧС	Мероприятия по предотвращению АС и ЧС	Мероприятия по ликвидации последствий АС и ЧС
1	Травмирование по причине падения с высоты собственного роста	1. Содержание помещения в надлежащем порядке. 2. Ограничение рабочего пространства. 3. Своевременное проведение инструктажа.	1. Осмотреть или опросить пострадавшего; 2. При необходимости вызвать скорую помощь по номеру 112; 3. При необходимости остановить кровотечение; 4. При подозрении перелома позвоночника у пострадавшего, необходимо обеспечить пострадавшему полный покой в положении лежа на спине до оказания квалифицированной медицинской помощи.

Продолжение таблицы 5.4

№	АС и ЧС	Мероприятия по предотвращению АС и ЧС	Мероприятия по ликвидации последствий АС и ЧС
2	Травмирование по причине удара электрическим током	1. Заземление всех электроустановок. 2. Ограничение рабочего пространства. 3. Обеспечение недоступности токоведущих частей аппаратуры. 4. Своевременное проведение инструктажа.	1. Быстро освободить пострадавшего от действия электрического тока; 2. Вызвать скорую помощь по номеру 112; 3. Если пострадавший потерял сознание, но дыхание сохранилось, его следует удобно уложить, расстегнуть стесняющую одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой; 4. Если пострадавший потерял сознание, необходимо дать понюхать пострадавшему нашатырный спирт, сбрызнуть лицо водой, растереть и согреть тело; 5. При отсутствии дыхания нужно немедленно делать искусственное дыхание и массаж сердца.
3	Пожар	1. Своевременное проведение инструктажа. 2. Установление средств автоматического пожаротушения в помещениях. 3. Установка датчиков дыма и огня. 4. Обеспечение путей эвакуации и поддержание их в надлежащем состоянии. 4. Контроль работы электроприборов	1. Обесточить помещение, прекратить поступление воздуха; 2. Немедленно сообщить о пожаре по номеру 112, также сообщить о пожаре дежурному или на пост охраны; 3. По возможности принять меры по эвакуации людей, тушению пожара и спасению материальных ценностей.

5.10 Выводы по разделу

В разделе рассмотрены следующие вредные и опасные факторы аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ:

- микроклимат [45, 46];
- шум [47];
- освещенность [48];
- электромагнитное излучение [49, 50];

- электробезопасность [51, 52];
- пожаровзрывобезопасность [53, 54];
- радиационная безопасность [55];

Аудитория № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ относится к категории В по пожаровзрывобезопасности [62] и к 1 категории по электробезопасности [51].

Также рассмотрены потенциальные аварийные и чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть при работе в аудитории № 042Б учебного корпуса № 10 ТПУ, и мероприятия по их предотвращению и ликвидации последствий согласно [51, 52, 53, 54].

Заключение

Определены нейтронно-физические и радиационные характеристики штатного и модифицированного топлива ВВЭР-1200 с повышенной глубиной выгорания.

В рамках данной работы получены следующие результаты:

- проведён нейтронно-физический расчёт в WIMS-D5B: для штатной ТВС ВВЭР-1200 начальный $k_{\infty} = 1,35$, для ТВС с AmO_2 $k_{\infty} = 1,27$, на конец кампании реактора k_{∞} в обоих случаях составляет 0,77, что говорит об эффективности использования AmO_2 как выгорающего поглотителя;

- проведён расчёт выгорания топлива: погрешность расчёта концентраций в WIMS-D5B в сравнении с MCNP6.2 в случае изотопов урана не превышает 6 %, а в случае вышестоящих нуклидов может составлять вплоть до 37 %. Значения для изотопов кюрия в WIMS-D5B вычислить невозможно, из-за чего в дальнейшем использовались данные MCNP6.2;

- проанализированы источники альфа- и нейтронного излучения свежего и облученного топлива, рассчитаны выходы нейтронов и их энергетические спектры: суммарный интегральный выход СД- и (α , n)-нейтронов ОЯТ после 7 лет выдержки в случае UO_2 (обогащение 4,89 %) $Y = 2,81 \cdot 10^6$ нейтр./($\text{с} \cdot \text{ТВС}$), при уменьшении обогащения до 4,85 % $Y = 2,91 \cdot 10^6$ нейтр./($\text{с} \cdot \text{ТВС}$), в случае $\text{UO}_2 + 0,2$ ат.% AmO_2 $Y = 7,27 \cdot 10^6$ нейтр./($\text{с} \cdot \text{ТВС}$). Вклад (α , n)-реакции значителен лишь на конец кампании реактора, так как уже через 1-2 года выдержки большинство ядер ^{242}Cm , вносящих основной вклад в интенсивность α -излучения, распадается. Так как основным источником нейтронного излучения ОЯТ является ^{244}Cm , который нарабатывается по цепочке из ^{238}U , то при уменьшении обогащения растёт выход нейтронов. Америций, введенный в топливо, выгорает, поглощая нейтроны, и преобразуется в изотопы кюрия, в том числе в ^{244}Cm , из-за чего растёт выход нейтронов. ^{241}Am является α -излучателем, поэтому при введении AmO_2 выход нейтронов свежего топлива увеличивается из-за (α , n)-реакции;

– рассчитаны радиационные характеристики нейтронного излучения топлива: мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения ОЯТ после 7 лет выдержки в случае UO_2 (обогащение 4,89 %) $\dot{H}_{T,R} = 6,18 \text{ Зв}/(\text{ч} \cdot \text{ТВС})$, при уменьшении обогащения до 4,85 % $\dot{H}_{T,R} = 6,40 \text{ Зв}/(\text{ч} \cdot \text{ТВС})$, в случае $\text{UO}_2 + 0,2 \text{ ат.}\% \text{ AmO}_2$ $\dot{H}_{T,R} = 15,98 \text{ Зв}/(\text{ч} \cdot \text{ТВС})$. Выявлено, что радиационная обстановка на стадиях ЯТЦ при использовании модифицированного топлива с AmO_2 остаётся приемлемой, но необходимо учитывать повышенную дозовую нагрузку при обращении с таким ОЯТ.

Список публикаций студента

1. Веретенников Д.Г. Радиационные характеристики нейтронного излучения модифицированного ядерного топлива реактора типа ВВЭР // Двадцать седьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных: материалы конференции, Екатеринбург, 3-6 апреля 2023. – Екатеринбург, 2023 – С. 77-78.

2. Веретенников Д.Г. Численная спектрометрия нейтронного излучения топлива ВВЭР: MCNP & Sources-4C моделирование // XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2023». Секция «Физика»: сборник тезисов, Москва, 10-21 апреля 2023. – М.: Физический факультет МГУ, 2023 – С. 82-84.

Список используемых источников

1. Shelley A. Use of americium as a burnable absorber for VVER-1200 reactor / A. Shelley, M. H. Ovi // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – V. 53. – P. 2454-2463.
2. Савченко А.М. Технико-экономическая оценка (исследование - ТЭИ) Проекта: «Перспективные научно-технические разработки материалов и технологий безопасных твэлов коммерческих водо-водяных реакторов». – 2017. – 41 с. – DOI: 10.13140/RG.2.2.27435.23848
3. Теплофизические свойства модифицированного оксидного ядерного топлива / В.Г. Баранов [и др.] // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110, вып. 1. – С. 36-40.
4. Панов В. С. Оценка использования модифицирующих добавок для повышения производительности ядерного топлива в реакторе / В. С. Панов, В. Ю. Лопатин, О. В. Мякишева // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2017. – Т. 21, № 2(71). – С. 48-59.
5. Total Neutron Yields from Light Elements Under Proton and Alpha Bombardment / J. H. Gibbons, R. L. Macklin // Physical Review. – 1959. – V. 114. – 571 p.
6. Рудик А.П. Физические основы ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1979. – 120 с.
7. Безопасность ядерных энергетических установок: учебное пособие для вузов / О.Б. Самойлов, Г.Б. Усынин, А.М. Бахметьев – М., Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.
8. Ядерное топливо для энергетических водоохлаждаемых реакторов. Состояние и перспективы / В.Ф. Коновалов [и др.] // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89, вып. 4. – С. 325-334.
9. Острейкин В. А. Эксплуатация атомных станций: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с.
10. Тепловыделяющая сборка ТВСА ВВЭР-1000: направления развития

и результаты эксплуатации / В.Б. Кандалов [и др.]. – М., Энергоатомиздат, 2014. – 318 с.

11. Физическое материаловедение. Том 6, часть 2. Ядерные топливные материалы: Учебник для вузов / Ю.Г. Годин, А.В. Тенишев, В.В. Новиков. – М.: МИФИ, 2008. – 604 с.

12. Топливные материалы в ядерной энергетике: учебное пособие / В.И. Бойко, Г.Н. Колпаков, О.В. Селиваникова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 186 с.

13. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 408 с

14. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрушечко [и др.]. – М.: Логос, 2010. – 604 с.

15. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: учебное пособие для вузов / Г.Г. Бартоломей [и др.]. – М., Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.

16. Физический расчет ядерного реактора на тепловых нейтронах: учебное пособие / В.И. Бойко [и др.]. – Томск: Изд-во Томского Политехнического Университета, 2009. – 504 с.

17. Виды ядерного топлива, используемые на станциях с ВВЭР [Электронный ресурс] / URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/publication2013/documents/299.pdf> – свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 15.05.2023)

18. Металлургия урана и технология его соединений: курс лекций: в 3 ч. / В. А. Волкович, А. Л. Смирнов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – Ч. 3. – 140 с.

19. Бекман И.Н. Ядерная индустрия: курс лекций. – М., 2005. – 867 с.

20. Исследование влияния легирующих добавок на структуру и свойства топливных таблеток на основе диоксида урана / В.С. Панов, Л.В. Мякишева, В.Ю. Лопатин // Вестник научно-технического развития. – 2012. – № 11(63). –

С. 23-29.

21. Модельное представление физико-химических и диффузионных процессов при термоэкстракции газа из легированного диоксида урана / В.Г. Баранов, А.В. Тенишев, А.В. Хлунов // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107, вып. 4. – С. 207-213.

22. Сааду Д. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР – М., Атомиздат, 2012. – 137 с.

23. Скачек М.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 448 с.

24. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлинённых кампаниях / А.Р. Музафаров, В.И. Савандер // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 2(43). – С. 42-54.

25. Ядерное уран-гадолиниевое топливо высокого выгорания на основе диоксида урана и способ его получения (варианты) // Патент России № 2362223С1. 2007. Бюл. № 20. / А.В. Лысиков, А.В. Кулешов, А.Н. Самохвалов.

26. Свойства модифицированного диоксида урана / И.С. Курина, В.В. Попов, В.Н. Румянцев // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 1. – С. 34-41.

27. Исследование свойств модифицированного диоксида урана / И.С. Курина, В.В. Попов, В.Н. Румянцев // Атомная энергия. – 2006. – Т. 101, вып. 5. – С. 347-352.

28. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с разными поглотителями / Б.Р. Бергельсон, В.В. Белоног, А.С. Герасимов, Г.В. Тихомиров // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109, вып. 4. – С. 194-197.

29. VVER-1000 fuel cycles analysis with different burnable absorbers / L. Frybortova // Nuclear Engineering and Design. – 2019. – V. 351. – P. 167-174.

30. The effect of burnable absorbers (Gd and Eu) on the neutronphysical characteristics of fuel assemblies of VVER-1000 reactors / M.A. Abu Sodos, V.M.

Demin, V.I. Savander // Journal of Physics: Conference Series – 2019. – V. 1189. – P. 1-9.

31. Neutronic analysis of VVER-1000 fuel assembly with different types of burnable absorbers using Monte-Carlo code Serpent / Hoai-Nam Tran, Hung T.P. Hoang, Peng Hong Liem // Energy Procedia. – 2017. – V. 131. – P. 29–36.

32. WIMS-D library update: final report of a coordinated research project. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2007. – 307 p.

33. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие / Г.Н. Колпаков, О.В. Селиваникова. – Томск: Изд-во Томского Политехнического Университета, 2009. – 118 с.

34. SOURCES 4C: A Code for Calculating (α, n), Spontaneous Fission, and Delayed Neutron Sources and Spectra / W.B. Wilson [et al]. – 2002. – 204 p.

35. ЦИТМ Экспонента [Электронный ресурс] / URL: <https://exponenta.ru/matlab/> – свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 15.05.2023) – Текст: электронный.

36. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 344 с.

37. Коэффициенты конверсии поток-доза для расчета поглощенной дозы высокоэнергетических адронов / Д.В. Горбатков, В.П. Крючков, О.В. Суманеев. – Протвино, 1999. – 15 с.

38. Иванов В.И. Курс дозиметрии: учебник для вузов. – М: Энергоатомиздат, 1988. – 400 с

39. Кузьмин А.В. Основы теории переноса нейтронов (лабораторный практикум): учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 192 с.

40. СанПиН 2.6.1.2800-10 «Требования радиационной безопасности при облучении населения природными источниками ионизирующего излучения» [Электронный ресурс] / URL: <https://docs.cntd.ru/document/902256355/> – свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 15.05.2023)

41. IAEA PRIS [Электронный ресурс] / URL: <https://pris.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=RU> – свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 15.05.2023) – Текст: электронный.

42. Производственный менеджмент: учебник для вузов / под ред. Романова А.Н., Горфинкеля В.Я., Максимцова М.М. – Москва: Проспект, 2012. – 395 с.

43. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев [и др.]. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014 – 36 с.

44. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071/> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

45. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003003> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

46. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901704046> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

47. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1) – URL: <http://docs.cntd.ru/document/5200291> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

48. СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1). – URL: <http://docs.cntd.ru/document/871001026> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

49. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901865498> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст:

электронный.

50. ГОСТ 12.1.006-84. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля – URL: <http://docs.cntd.ru/document/5200272> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

51. ГОСТ Р 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. – URL: <https://beta.docs.cntd.ru/document/1200161238> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

52. ГОСТ Р МЭК 61140-2000. Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200017996> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

53. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9051953> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

54. СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений (с Изменениями N 1, 2) [Текст]. – Введ. 01.01.1998 – Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 21 с.

55. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 – URL: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

56. ГОСТ 32548-2013. Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Общие технические условия. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110084> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

57. Вентиляторы воздуховода / Vilpe Roofing. – URL: <https://vilpe->

roofing.ru/ventilyator-vozduhovoda-xl-eco250p-200-700-r-0-1250m3-ch-zelenyj/
(дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

58. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование –
URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035579> (дата обращения: 15.05.2023)

59. ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума. – URL:
<http://docs.cntd.ru/document/5200292> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст:
электронный.

60. ГОСТ 12.4.026-76*. Система стандартов безопасности труда. Цвета
сигнальные и знаки безопасности. – URL:
<http://docs.cntd.ru/document/1200003391> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст:
электронный.

61. Лампы люминесцентные / ВсеИнструменты.ру. – URL:
<https://www.vseinstrumenti.ru/product/kompaktnaya-lyuminestsentnaya-neintegrirovannaya-lampa-osram-dulux-t-e-42w-830-plus-gx24q-4050300425641-1920803/> (дата обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

62. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и
наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм.
№ 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643). Текст: электронный.
Доступ из сборника НСИС ПБ. – 2011. – № 2 (45).

63. ГОСТ Р 22.0.02-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.
Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139176> (дата
обращения: 15.05.2023). – Текст: электронный.

Приложение А

(обязательное)

Фрагмент листинга входного файла WIMS-D5B

```
SEQU 4
CELL 7
NGROUP 69 2
NMESH 73 73
NREGION 13 10 53
NMATERIAL 20 15 0
NROD 330 1 100 20 15 7 1
PREOUT
INITIATE
FEWG 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
      11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
      21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
      31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
      41 42 43 44 45 46 47 48 49 50
      51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
      61 62 63 64 65 66 67 68 69
ANNULUS 1 0.3865 13
--
ARRA 1 1 6 1.2203 0.0000
--
RODS 1 1 0.060 0
--
MATE 1 -1 873. 1 2235 0.001163 8238 0.022320 $
234 0.00001034 236 0.00000540 6016 0.04699749
--
MESH 1 1 5 5 7 12 7 7 5 12 5 5 1
NPIJ 12
POWERC 1 60 1 1
SUPP 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1
DENS 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
      1 1 1
      0.717 0.717 0.717
      1 1 1 1
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 60 1 1
BEGINC
BEGINC
```

Приложение Б

(обязательное)

Фрагмент листинга входного файла SOURCES-4C

EOC

1 2 1

6 0

008 0.6808923

092 0.3157101

093 0.0002742

094 0.0029994

095 0.0000817

096 0.0000422

48 12.0 0.0

17

0922330 6.425E+13

0922340 4.479E+18

0922350 8.850E+19

0922360 1.684E+20

0922380 2.153E+22

0932370 1.650E+19

0932390 2.427E+18

0942380 8.060E+18

0942390 8.391E+19

0942400 6.267E+19

0942410 2.665E+19

0942420 2.574E+19

0952410 6.419E+17

0952420 3.148E+15

0952430 4.997E+18

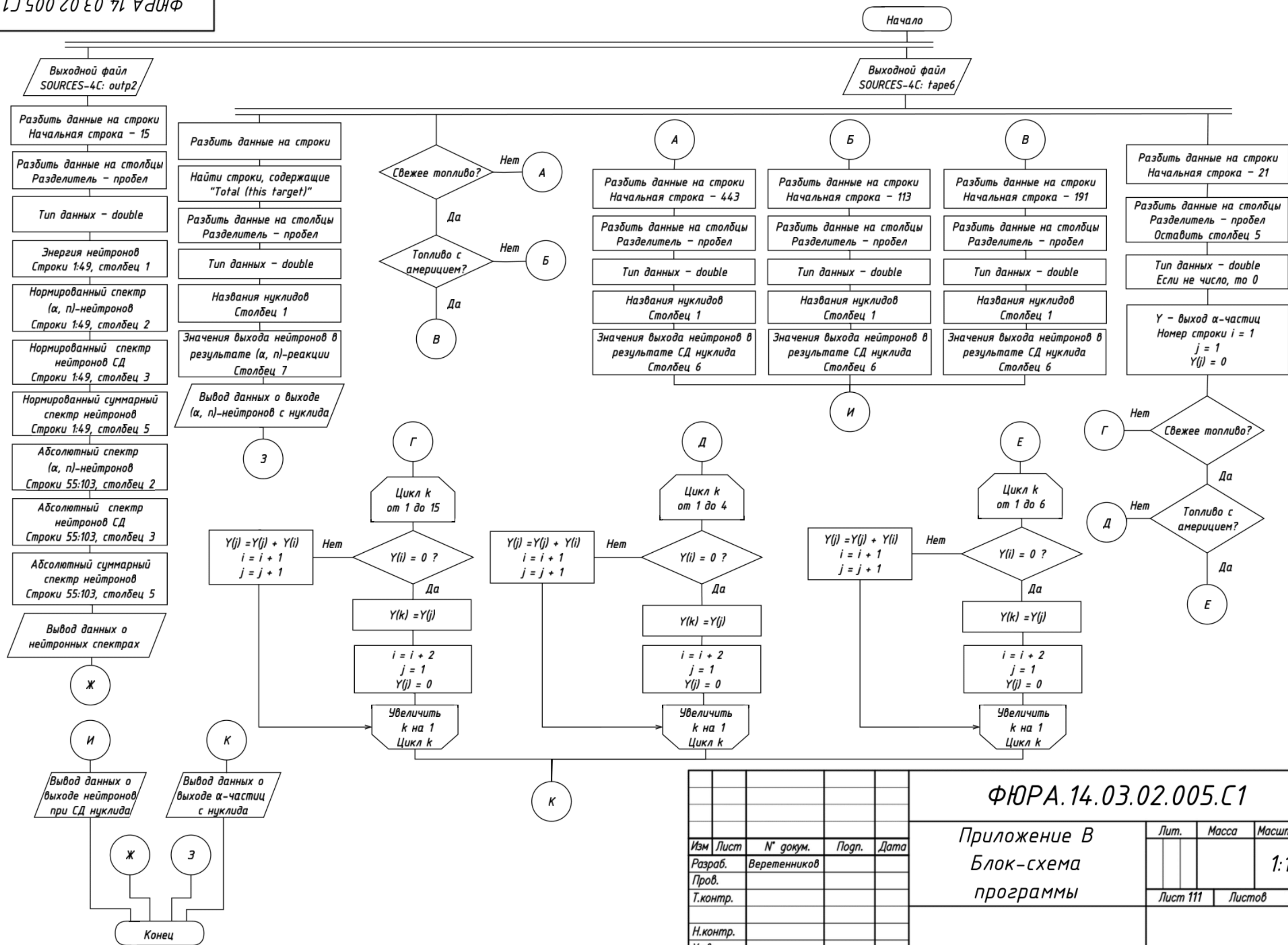
0962420 5.392E+17

0962440 2.377E+18

2 4000

0080170 0.000253

0080180 0.001333



ФЮРА.14.03.02.005.С1

Приложение В
Блок-схема
программы

Лит.	Масса	Масштаб
		1:1
Лист 111	Листов	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Веретенников		
Пров.				
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Копировал

Формат А3

Приложение Г

(обязательное)

Спектры целевых для (α, n) -реакции элементов

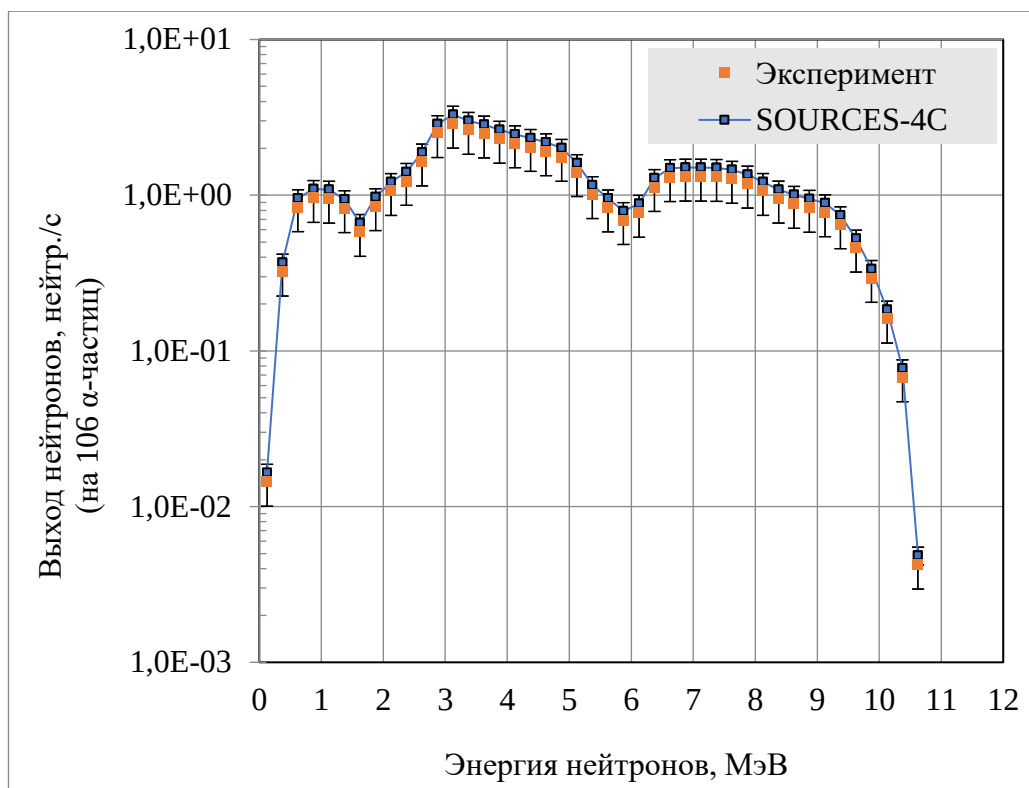


Рисунок Г.1 – Нейтронный спектр бериллия

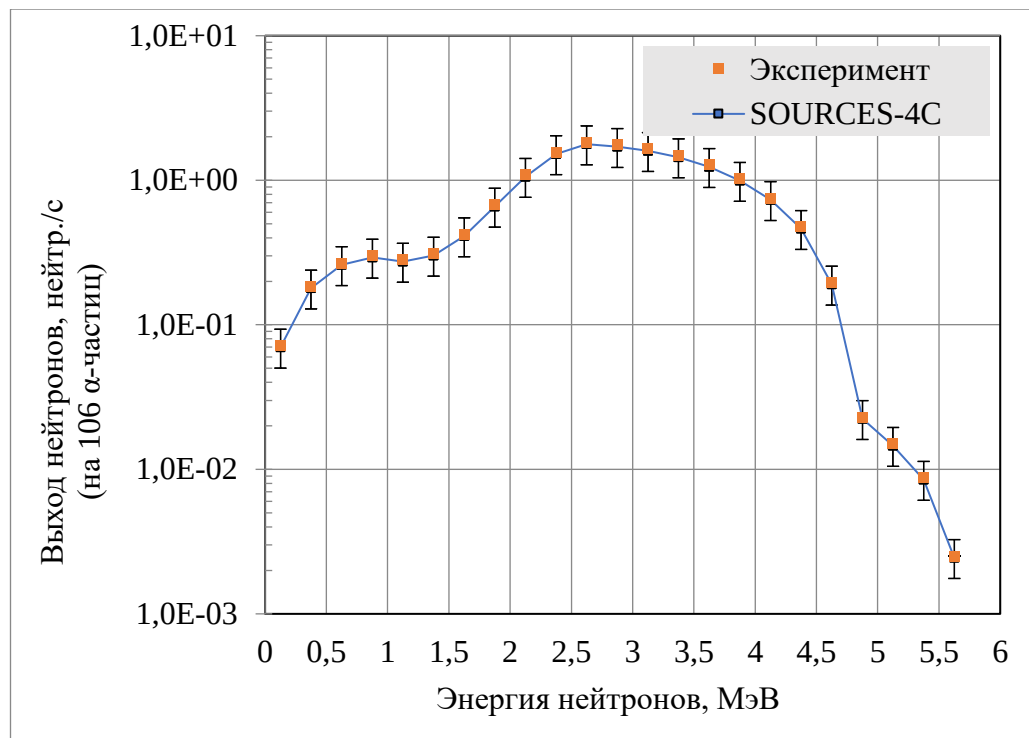


Рисунок Г.2 – Нейтронный спектр бора

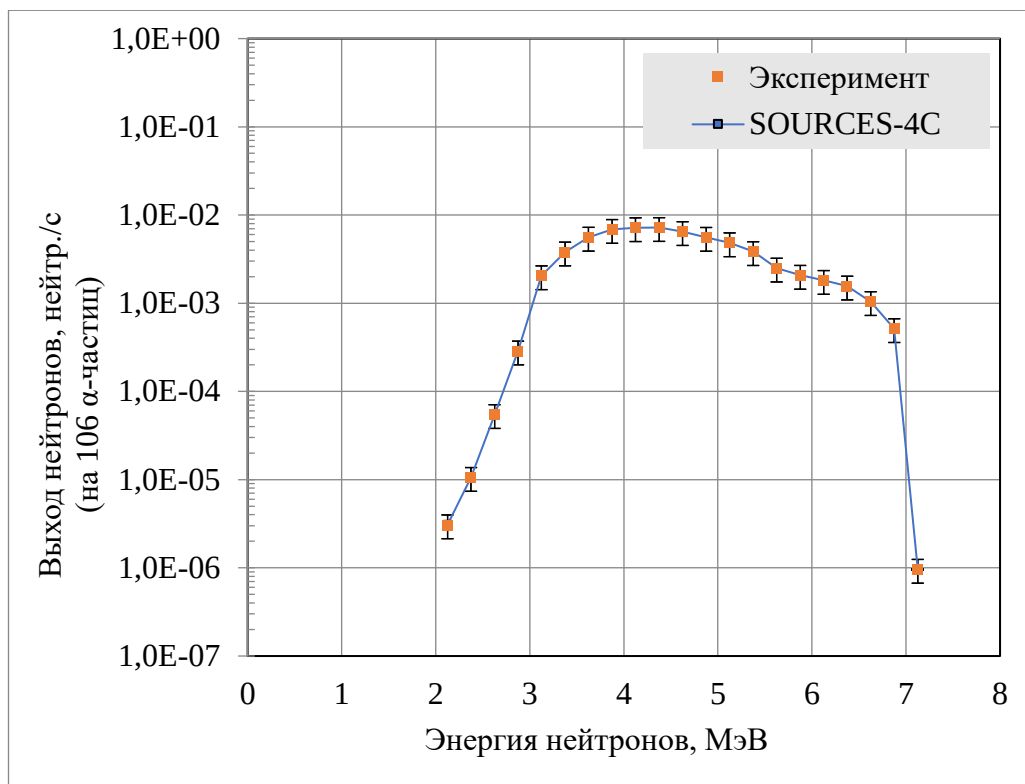


Рисунок Г.3 – Нейтронный спектр углерода

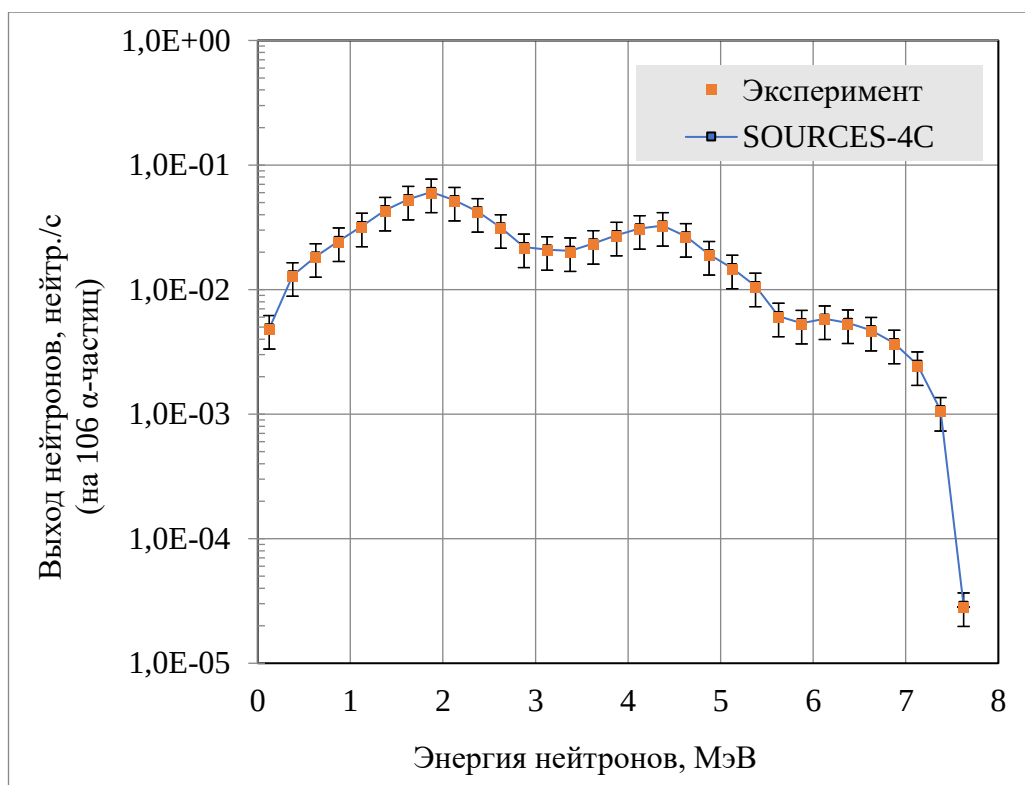


Рисунок Г.4 – Нейтронный спектр магния

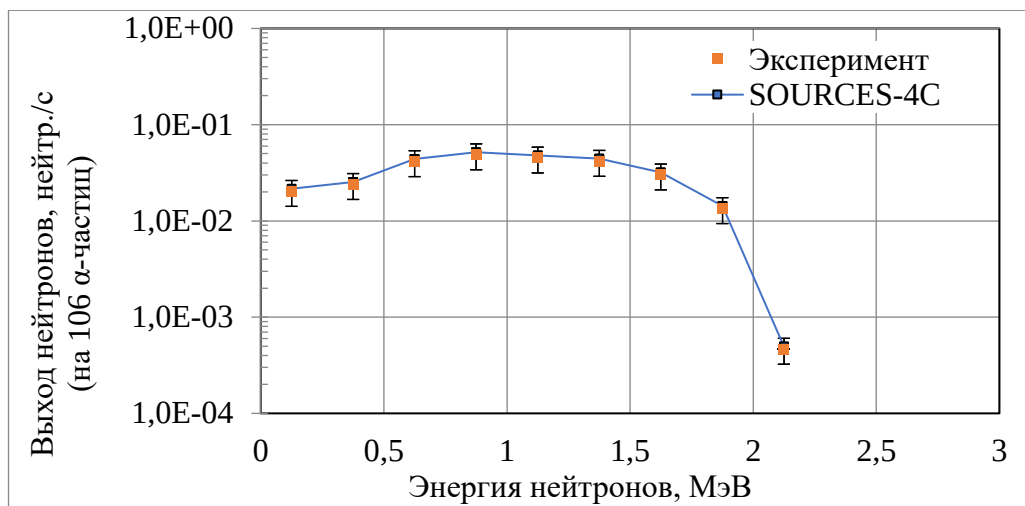


Рисунок Г.5 – Нейтронный спектр алюминия

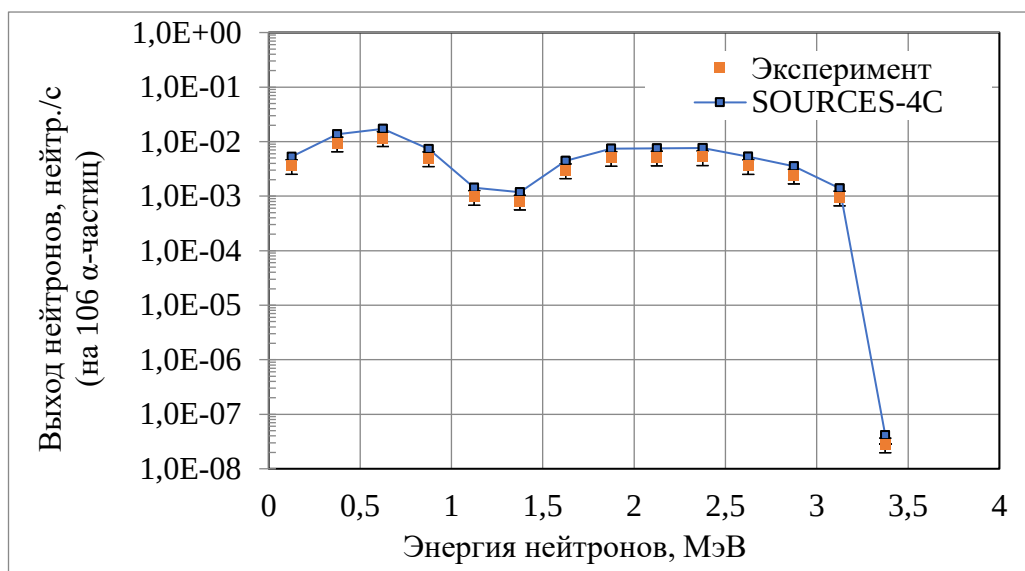


Рисунок Г.6 – Нейтронный спектр кремния

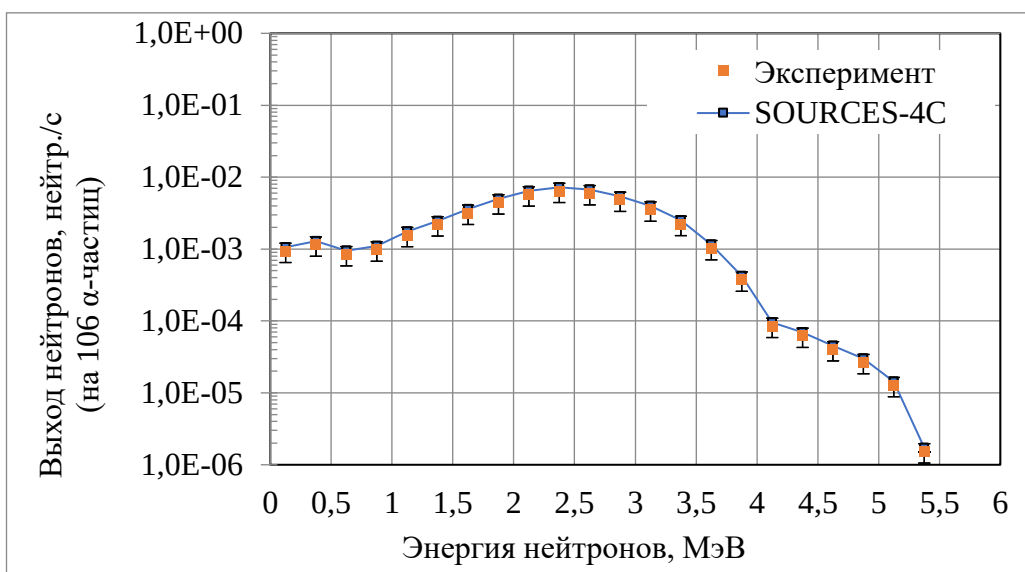


Рисунок Г.7 – Нейтронный спектр кислорода

Приложение Д

(обязательное)

Изменение нуклидного состава топлива

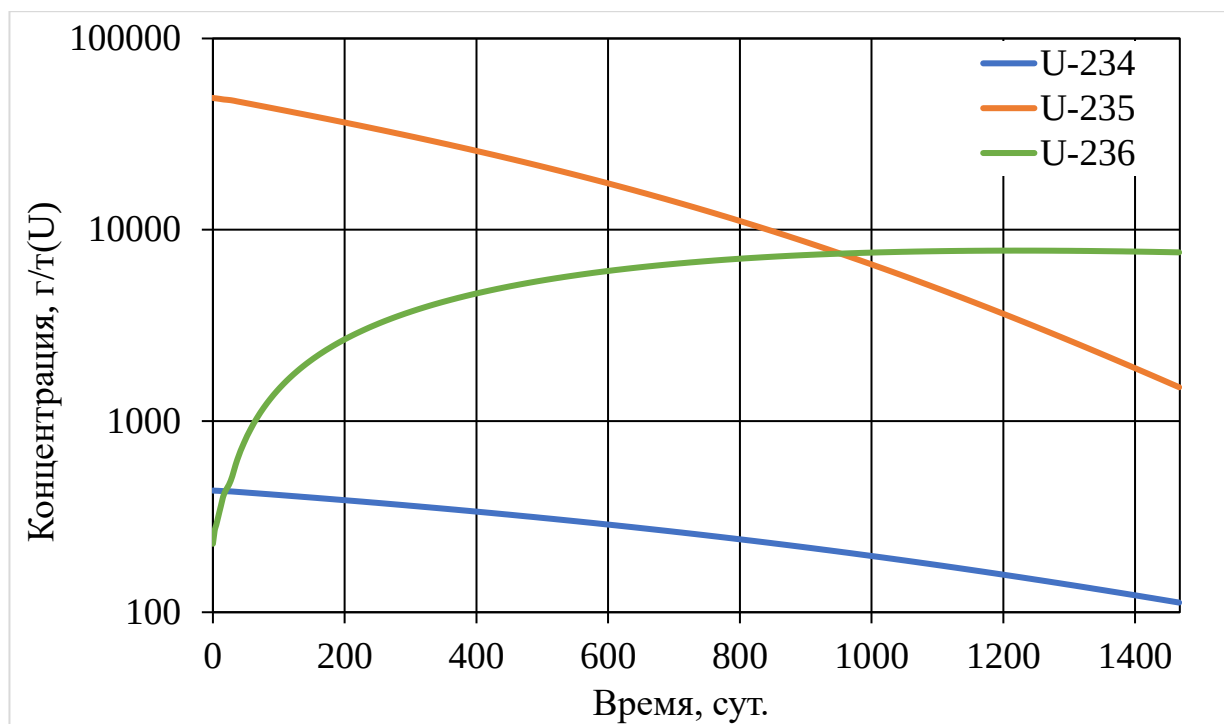


Рисунок Д.1 – График зависимости концентраций изотопов урана от времени

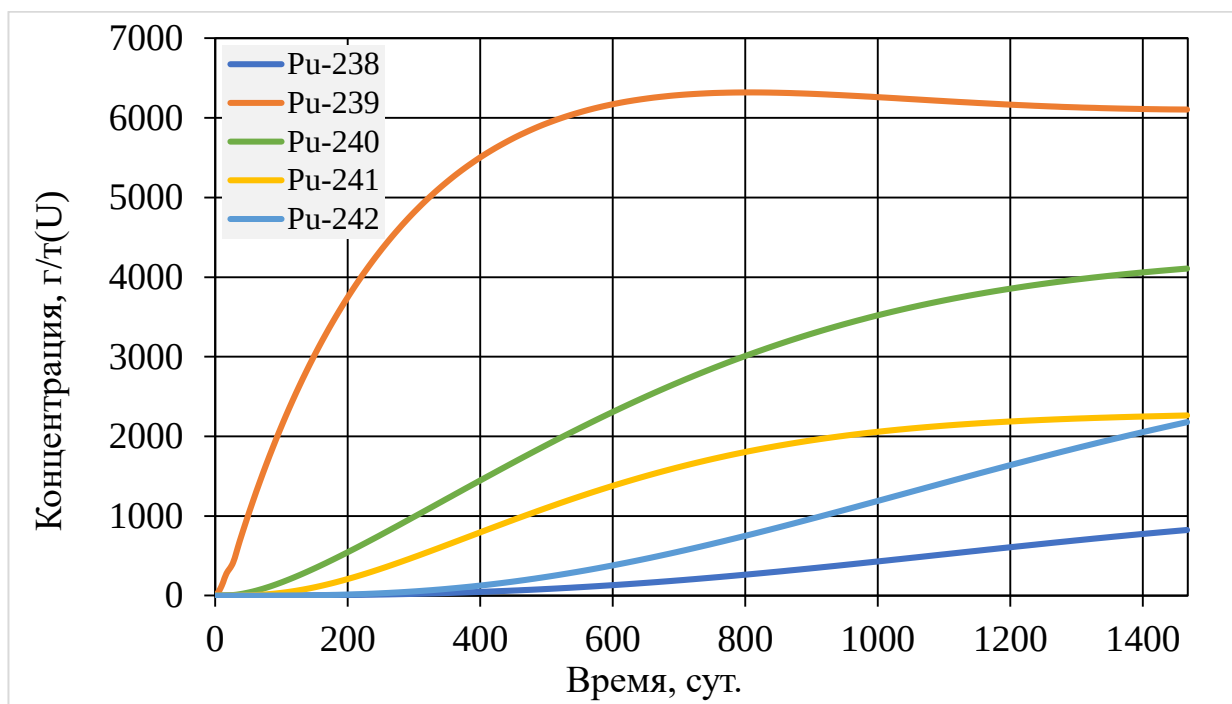


Рисунок Д.2 – График зависимости концентраций изотопов плутония от времени

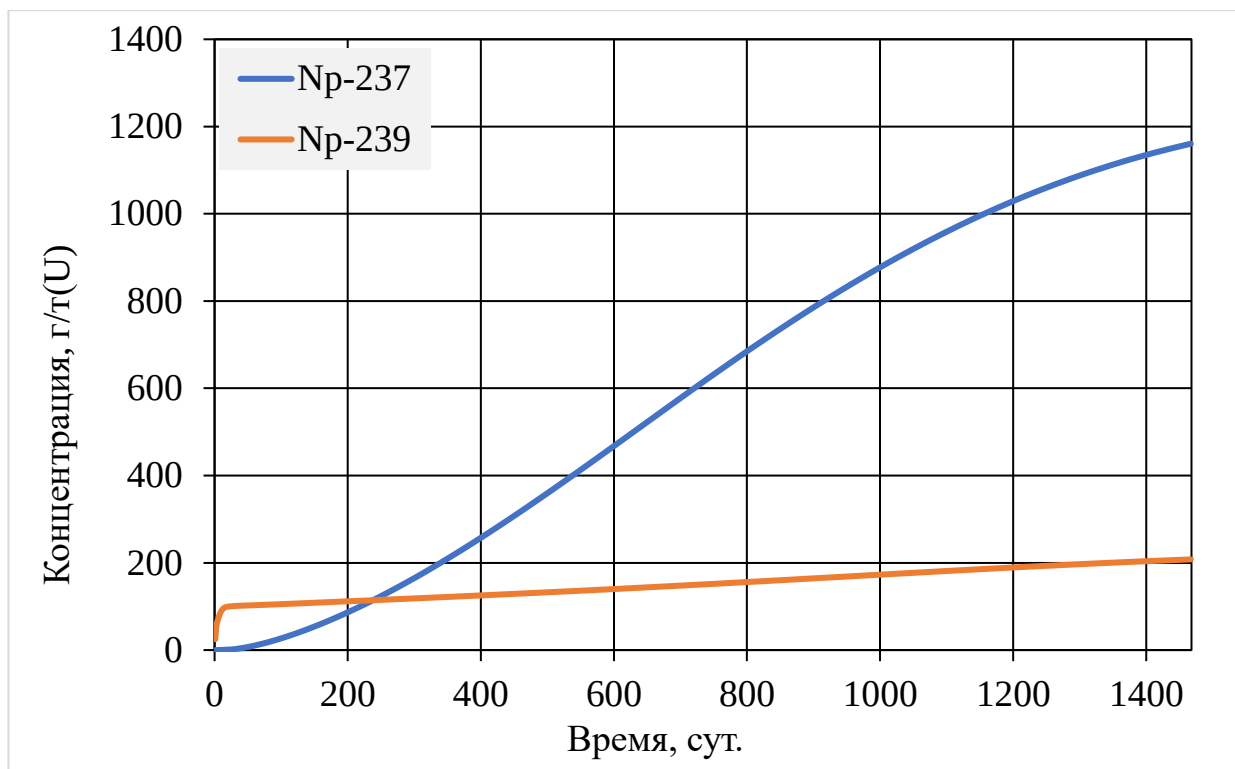


Рисунок Д.3 – График зависимости концентраций изотопов нептуния от времени

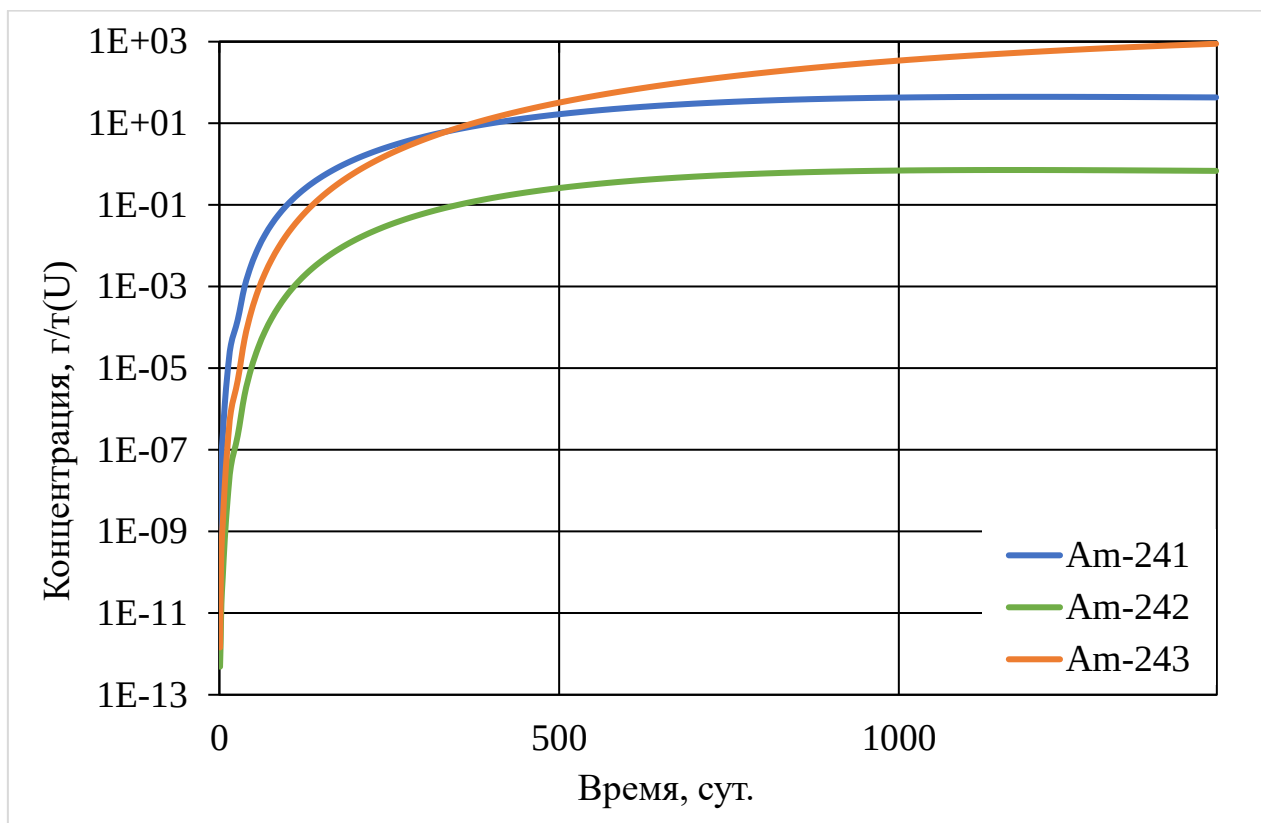


Рисунок Д.4 – График зависимости концентраций изотопов америция от времени

Приложение Е

(обязательное)

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов

Таблица Е.1 – Коэффициенты аппроксимирующего полинома в случае топлива № 1

	СД	(α, n)-реакция						
	Начало кампании	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
A	4,694E+00	-7,338E-01	4,011E+00	3,503E+00	3,129E+00	3,075E+00	3,068E+00	3,002E+00
B ₁	4,039E-01	3,337E+00	2,190E+00	2,190E+00	2,190E+00	2,190E+00	2,190E+00	2,190E+00
B ₂	-4,119E-01	-1,555E+01	-4,902E+00	-4,902E+00	-4,902E+00	-4,902E+00	-4,902E+00	-4,902E+00
B ₃	1,475E-01	2,854E+01	5,501E+00	5,501E+00	5,501E+00	5,501E+00	5,501E+00	5,501E+00
B ₄	-3,670E-02	-2,609E+01	-3,106E+00	-3,106E+00	-3,106E+00	-3,106E+00	-3,106E+00	-3,106E+00
B ₅	6,110E-03	1,359E+01	9,362E-01	9,362E-01	9,362E-01	9,362E-01	9,362E-01	9,362E-01
B ₆	-6,644E-04	-4,218E+00	-1,439E-01	-1,439E-01	-1,439E-01	-1,439E-01	-1,439E-01	-1,439E-01
B ₇	4,519E-05	7,685E-01	7,650E-03	7,650E-03	7,650E-03	7,650E-03	7,650E-03	7,650E-03
B ₈	-1,740E-06	-7,567E-02	5,114E-04	5,114E-04	5,114E-04	5,114E-04	5,114E-04	5,114E-04
B ₉	2,892E-08	3,100E-03	-5,628E-05	-5,628E-05	-5,628E-05	-5,628E-05	-5,628E-05	-5,628E-05

Таблица Е.2 – Коэффициенты аппроксимирующего полинома в случае топлива № 2

	СД	(α, n)-реакция						
	Начало кампании	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
A	4,695E+00	-7,389E-01	4,016E+00	3,508E+00	3,138E+00	3,083E+00	3,077E+00	3,009E+00
B ₁	4,014E-01	3,334E+00	2,195E+00	2,195E+00	2,195E+00	2,195E+00	2,195E+00	2,195E+00
B ₂	-4,092E-01	-1,553E+01	-4,920E+00	-4,920E+00	-4,920E+00	-4,920E+00	-4,920E+00	-4,920E+00

Продолжение таблицы Е.2

	СД	(α, n)-реакция						
	Начало кампании	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
B ₃	1,461E-01	2,851E+01	5,532E+00	5,532E+00	5,532E+00	5,532E+00	5,532E+00	5,532E+00
B ₄	-3,628E-02	-2,606E+01	-3,131E+00	-3,131E+00	-3,131E+00	-3,131E+00	-3,131E+00	-3,131E+00
B ₅	6,040E-03	1,358E+01	9,484E-01	9,484E-01	9,484E-01	9,484E-01	9,484E-01	9,484E-01
B ₆	-6,568E-04	-4,213E+00	-1,473E-01	-1,473E-01	-1,473E-01	-1,473E-01	-1,473E-01	-1,473E-01
B ₇	4,473E-05	7,677E-01	8,200E-03	8,200E-03	8,200E-03	8,200E-03	8,200E-03	8,200E-03
B ₈	-1,726E-06	-7,559E-02	4,633E-04	4,633E-04	4,633E-04	4,633E-04	4,633E-04	4,633E-04
B ₉	2,875E-08	3,100E-03	-5,454E-05	-5,454E-05	-5,454E-05	-5,454E-05	-5,454E-05	-5,454E-05

Таблица Е.3 – Коэффициенты аппроксимирующего полинома в случае топлива № 3

	СД	(α, n)-реакция						
	Начало кампании	Начало кампании	Конец кампании	1 год выдержки	2 года выдержки	3 года выдержки	5 лет выдержки	7 лет выдержки
A	4,685E+00	2,670E+00	4,437E+00	3,903E+00	3,449E+00	3,385E+00	3,370E+00	3,344E+00
B ₁	3,817E-01	2,886E+00	2,087E+00	2,087E+00	2,087E+00	2,087E+00	2,087E+00	2,087E+00
B ₂	-3,826E-01	-7,403E+00	-4,507E+00	-4,507E+00	-4,507E+00	-4,507E+00	-4,507E+00	-4,507E+00
B ₃	1,324E-01	9,080E+00	4,887E+00	4,887E+00	4,887E+00	4,887E+00	4,887E+00	4,887E+00
B ₄	-3,169E-02	-5,674E+00	-2,612E+00	-2,612E+00	-2,612E+00	-2,612E+00	-2,612E+00	-2,612E+00
B ₅	5,090E-03	1,943E+00	7,091E-01	7,091E-01	7,091E-01	7,091E-01	7,091E-01	7,091E-01
B ₆	-5,358E-04	-3,575E-01	-8,181E-02	-8,181E-02	-8,181E-02	-8,181E-02	-8,181E-02	-8,181E-02
B ₇	3,533E-05	2,884E-02	-2,300E-03	-2,300E-03	-2,300E-03	-2,300E-03	-2,300E-03	-2,300E-03
B ₈	-1,323E-06	1,329E-04	1,370E-03	1,370E-03	1,370E-03	1,370E-03	1,370E-03	1,370E-03
B ₉	2,143E-08	-1,086E-04	-8,716E-05	-8,716E-05	-8,716E-05	-8,716E-05	-8,716E-05	-8,716E-05