

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии
Кафедра Физико-энергетических установок

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Влияние «водяных» твэлов на нейтронно-физические параметры реактора ВВЭР-1000

УДК 621.039.548:621.039.577

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ5В	Бородач Александр Владиславович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ ФТИ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	к.экон.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Планируемые результаты обучения.

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

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

Институт Физико-технический
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии
 Кафедра Физико-энергетические установки

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

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Бородач Александр Владиславович

Тема работы:

Влияние «водяных» ТВЭЛов на нейтронно-физические параметры реактора ВВЭР-1000
Утверждена приказом директора

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none"> - литературные источники; - конструкторская документация
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none"> - Обзор литературных источников по теме проекта; - Получение зависимостей накопления U^{235}, Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания, при разной концентрации газа, а также при разном количестве добавлении «водяных» ТВЭЛов; - Получение зависимостей изменения запаса реактивности от глубины выгорания, при разной концентрации газа, а также при разном количестве добавлении «водяных» ТВЭЛов; - Определение температурного эффекта и коэффициента реактивности; - Анализ влияния «водяных» ТВЭЛов на

	нейтронно-физические параметры реактора ВВЭР-1000; – Оценка возможности использования «водяных» твэлов для повышения нейтронно-физических параметров реактора.
Перечень графического материала	Презентация доклада, сборочный чертеж, спецификация

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент кафедры МЕН ИСГТ, к.экон.н. Верховская М.В.
Социальная ответственность	ассистент кафедры ПФ ФТИ, к.ф.- м.н. Гоголева Т.С.
Иностранный язык	ст. преп. кафедры ИЯФТ Кабрышева О.П.

Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ ФТИ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Бородач А.В.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Бородач Александр Владиславович

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

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

<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> 2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i> 3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i> 	<p style="text-align: center;">Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах</p>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i> 2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i> 3. <i>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования</i> 	<p style="text-align: center;">Оценочная карта конкурентных технических решений</p> <p style="text-align: center;">Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта</p> <p style="text-align: center;">Определение ресурсоэффективности проекта</p>
--	---

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. *Оценочная карта конкурентных технических решений*
2. *Матрица SWOT*
3. *Иерархическая структура работ*
4. *Календарный план проекта*
5. *Бюджет проекта*
6. *Определение ресурсоэффективности проекта*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	к.ЭКОН.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Бородач Александр Владиславович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Бородач Александр Владиславович

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> – вредных факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, электромагнитные поля, ионизирующее излучение); – опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	электробезопасность, пожаробезопасность, требования по охране труда при работе на ПЭВМ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> – воздействие на организм человека; – приведение допустимых норм; – предлагаемые средства защиты.
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Бородач Александр Владиславович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа включает в себя 115 с., 38 рис., 39 табл., 23 источников, 3 прил.

Ключевые слова: «водяной» ТВЭЛ, ВВЭР-1000, выгорание, ядерные концентрации.

Объектом исследования является нейтронно-физические параметры реактора ВВЭР-1000.

Цель работы: проанализировать влияние «водяных» ТВЭЛов на нейтронно-физические параметры реактора.

В процессе выполнения магистерской диссертации проводился анализ влияния «водяных» ТВЭЛов на нейтронно-физические параметры реактора.

В результате исследования получены зависимости выгорания U^{235} , накопления Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания, при разной концентрации пароводяной смеси, а также при разном количестве добавлении «водяных» ТВЭЛов. Получены зависимости изменения запаса реактивности от глубины выгорания, при разной концентрации пароводяной смеси, а также при разном количестве добавлении «водяных» ТВЭЛов. Так же были определены температурные эффекты и коэффициенты реактивности.

Область применения: атомная промышленность.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

Обозначения и сокращения

АЗ – активная зона;

БЗТ – блок защитных труб;

ВРК – внутрореакторный контроль;

ГЦН – главный циркуляционный насос;

ПС СУЗ – поглощающий стержень системы управления и защиты;

ПЭЛ – поглощающий элемент;

СВП – стержни выгорающего поглотителя;

СУЗ стержень системы управления и защиты;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент.

Оглавление

Введение.....	11
1 Обзор литературы	13
1.1 Активная зона	13
1.2 Проектные основы	20
1.7 Описание программы WIMS-D5.....	22
2 Расчетная часть.....	25
2.1 Расчет штатной модели реактора	25
2.2 Расчет модели реактора с добавлением 6 «водяных» ТВЭЛОВ	28
2.3 Расчет модели реактора с добавлением 12 «водяных» ТВЭЛОВ	34
2.4 Расчет модели реактора с добавлением 18 «водяных» ТВЭЛОВ	40
2.5 Расчет модели реактора с добавлением 6 «водяных» ТВЭЛОВ с увеличенным обогащением топлива	46
2.6 Определение температурного эффекта и коэффициента реактивности.....	53
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	55
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования	55
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений	56
3.1.2 SWOT-анализ.....	58
3.2 Планирование управления научно-техническим проектом.....	61
3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	61
3.2.2 Контрольные события проекта	62
3.2.3 План проекта.....	63
3.3 Бюджет научного исследования	65
3.3.1 Расчёт материальных затрат	66
3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	67
3.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	69
3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды	70
3.3.5 Накладные расходы.....	70
3.3.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	71

3.4 Организационная структура проекта	71
3.5 Матрица ответственности	72
3.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	74
4 Социальная ответственность	74
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	74
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	75
4.2.1 Организационные мероприятия.....	75
4.2.2 Технические мероприятия.....	76
4.2.3 Условия безопасной работы.....	78
4.3 Электробезопасность	81
4 Пожарная и взрывная безопасность.....	82
Заключение	85
Список использованной литературы и источников.....	89
Приложение А	91

Введение

В данной работе был произведен расчёт ректора ВВЭР - 1000 с использованием «водяных» твэлов, получены зависимости выгорания U^{235} , накопления Pu^{239} и Pu^{241} при разной концентрации пароводяной смеси, и при разном количестве добавления «водяных» твэлов. Были найдены и построены зависимости изменения запаса реактивности от глубины выгорания. Построены зависимости ТЭР и ТКР. Расчеты проводились для «холодного» и «горячего» реактора.

Научная новизна работы заключается в том, что на данный момент нету работ или научных статей на рассмотрение влияния «водяных» твэлов на нейтронно-физические параметры реактора ВВЭР-1000.

Актуальность работы заключается в том, что одним из перспективных типов реакторов является водо-водяной энергетический реактор. С помощью данной работы можно продлить кампанию реактора, в следствии чего увеличится выработка электроэнергии при одной и той же нагрузке и уменьшится себестоимость топливной составляющей электроэнергии.

Практическая ценность заключается в том, что на базе реактора ВК-50 была проделана похожая работа более 30 лет назад, что дало положительный результат.

Цель работы: проанализировать влияние «водяных» твэлов на нейтронно-физические параметры реактора.

Задачи:

- Провести аналитический обзор литературных источников по теме проекта;
- Получение зависимостей накопления U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания, при разной концентрации пароводяной смеси, а также при разном количестве добавлении «водяных» твэлов.
- Получение зависимостей изменения запаса реактивности от глубины выгорания, при разной концентрации пароводяной смеси, а также при

разном количестве добавлении «водяных» ТВЭЛОВ.

- Определение температурного эффекта и коэффициента реактивности
- Анализ влияния «водяных» ТВЭЛОВ на нейтронно-физические параметры реактора.
- Оценка возможности использования «водяных» ТВЭЛОВ для повышения нейтронно-физических параметров реактора.

ТВЭЛЫ в ТВС энергетических реакторов размещены, как правило, в узлах треугольной решетки (ВВЭР). Но в некоторых из них (ВК-50) такая однородность нарушается путем удаления части твэлов с целью повышения нейтронно-физических параметров. Предыдущая компоновка ТВС реактора ВК-50 содержала 168 твэлов с обогащением менее 2%. Более 30 лет назад активная зона реактора была модернизирована: из каждой ТВС было удалено по 30 твэлов, на месте которых были размещены трубки с водяным теплоносителем («водяные» твэлы). Для сохранения размножающих свойств активной зоны одновременно было повышено обогащение топлива (до 2.3 %). Это позволило повысить нейтронно-физические параметры реактора. В настоящей работе сделана оценка влияния введения подобных водяных твэлов на характеристики реактора ВВЭР-1000.

1 Обзор литературы

1.1 Активная зона

Активная зона реактора ВВЭР-1000 предназначена для генерирования тепла и передачи его с поверхности тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) теплоносителю в течение проектного срока работы без превышения допустимых пределов повреждения ТВЭЛОВ [1].

Активная зона ВВЭР-1000 состоит из 163 тепловыделяющих сборок (ТВС), в которых, в соответствии с картограммой активной зоны, размещены поглощающие стержни системы управления и защиты (ПС СУЗ) и пучки стержней выгорающего поглотителя (пучки СВП), либо поглотитель вводится в ТВЭЛЫ [1].

ПС СУЗ предназначены для быстрого прекращения ядерной реакции в активной зоне, поддержания мощности на заданном уровне, ее перевода с одного уровня на другой, выравнивания поля энерговыделения по объему активной зоны, предупреждения и подавления ксеноновых колебаний [2].

Пучки СВП предназначены для выравнивания поля энерговыделения по объему активной зоны, для компенсации запаса реактивности в начале цикла выгорания топлива и обеспечения работы реактора в области отрицательных коэффициентов реактивности по температуре теплоносителя и положительных коэффициентов по плотности теплоносителя [2].

Активная зона ВВЭР-1000 и ее составные части удовлетворяют требованиям нормативно-технических документов Госатомнадзора РФ.

Для активной зоны ВВЭР установлены следующие проектные критерии [3, 4]:

- не превышение допустимых пределов повреждения оболочек ТВЭЛОВ в пределах проектного срока службы;
- обеспечение и поддержание требуемой геометрии и положения ТВЭЛОВ в ТВС и ТВС в активной зоне;

- обеспечение возможности осевого и радиального расширения ТВЭЛов и ТВС при температурных и радиационных воздействиях, разности давлений, взаимодействии таблеток топлива с оболочкой ТВЭЛов;
- обеспечение необходимого расхода теплоносителя для охлаждения ТВС в проектных режимах;
- обеспечение прочности топливной системы, способной выдерживать все механические нагрузки в проектных режимах;
- обеспечение вибростойкости при взаимодействии с потоком теплоносителя;
- обеспечение стойкости материалов против коррозионных, электрохимических, тепловых, механических и радиационных воздействий;
- обеспечение требуемого запаса до кризиса теплообмена;
- не превышение заданных значений температуры топлива и оболочек ТВЭЛов;
- обеспечение стойкости ПС СУЗ от воздействия нейтронного потока, температуры, перепада давления, износа и ударов, связанных с перемещениями;
- обеспечение возможности размещения внутри ТВС датчиков внутриреакторного контроля (ВРК);
- обеспечение взаимозаменяемости свежих и частично выгоревших ТВС и ПС СУЗ путем унификации установочных размеров;
- обеспечение безопасности обращения с топливом, транспортировки его на АЭС и загрузки в реактор;
- выполнение критериев аварийного охлаждения активной зоны;
- сведение к минимуму реакций между металлом и водой с выполнением установленных критериев;
- перевод активной зоны в подкритическое состояние и поддержание этого состояния;
- возможность послеаварийного расхолаживания ТВС, а также демонтажа ТВС и внутрикорпусных устройств (ВКУ);

– изменения реактивности не должны приводить к недопустимому увеличению радиально усредненной энтальпии топлива в любой точке в любом топливном стержне, а также превышать значение, установленные ПБЯ.

Конструкция ТВС обеспечивает возможность свободного теплового и радиационного перемещения её элементов. Свободное тепловое и радиационное удлинение твэлов обеспечивается достаточным зазором между пучком твэлов и головкой ТВС. Радиальное расширение ТВС, как функция температуры и облучения, не превышает величины зазора между кассетами в активной зоне. Наличие запаса хода пружин в головке ТВС обеспечивает компенсацию технологических допусков и разности температурных расширений между элементами ТВС и внутрикорпусными устройствами реактора [1, 5].

Фиксация ТВС в плане осуществляется фиксатором на хвостовике и шпонками на головке ТВС. Ответные пазы находятся соответственно в элементах шахты и блока защитных труб (БЗТ) реактора [1].

Выбранные предельные значения отклонений ТВС, шахты и БЗТ реактора обеспечивают собираемость активной зоны.

В режимах нормальной эксплуатации активной зоны, при перегрузке и транспортировке топлива обеспечивается исключение повреждения ТВС [5].

Для обеспечения прочности ТВС и сохранения ее геометрических размеров ограничиваются скорость перемещения ТВС при транспортно-технологических операциях и прилагаемые к ней усилия. При захвате ТВС перегрузочной машиной крутящий момент на головке ТВС не допускается [2].

Направляющие каналы ТВС и каналы блока защитных труб реактора надежно защищают ПС СУЗ от поперечного воздействия потока теплоносителя. Выбранные зазоры обеспечивают возможность свободного перемещения ПС СУЗ, а также обеспечивают возможность протока части теплоносителя для снятия тепловыделения с поглощающих элементов (пэлов) [6].

Первый контур является гидродинамическим контуром, в котором могут возникать пульсации давления в местах сужения, расширения, поворота потока теплоносителя. Кроме этого, пульсации давления могут быть вызваны работой ГЦН. По результатам замеров на АЭС пульсации давления по внутрикорпусному тракту ВВЭР-1000 не превышают 0,01 МПа. Поджатие кассеты через подвижную цилиндрическую обечайку головки и пружинный блок обеспечивает удержание кассеты от всплытия при воздействии перепада давления [4].

Указанные конструктивные меры обеспечивают работоспособность ТВС, а также выполнение требований безопасной эксплуатации топлива.

Конструкция ТВС удовлетворяет проектным критериям для проектных режимов эксплуатации реакторной установки, которые включают в себя режимы нормальной эксплуатации (НУЭ), нарушения нормальной эксплуатации (ННУЭ) и проектные аварии [1].

К режимам НУЭ относятся плановые ситуации как при эксплуатации реакторной установки, так и при обращении с топливом во время перегрузки, транспортировки и хранения.

Механические нагрузки на ТВС при НУЭ не должны приводить к превышению допустимых повреждений для ТВС и налагать ограничения на эксплуатацию.

Определяющими режимами НУЭ, при которых возникают максимальные механические нагрузки на ТВС, являются [7]:

- нагрузки при обращении со «свежим» топливом и его транспортировке;
- разогрев реактора от холодного до горячего состояния;
- подъем мощности реактора;
- быстрый останов реактора.

При этом не должен превышаться эксплуатационный предел повреждения ТВЭЛ.

В режимах с ННУЭ эксплуатационный предел повреждения топлива также не превышает.

К проектным авариям относятся ситуации, при которых может быть нарушена целостность и работоспособность топлива, превышен предел безопасной эксплуатации, однако механические повреждения не должны нарушить работу средств обеспечения безопасности (не превышение максимального проектного предела повреждения топлива). В этих случаях требуется выгрузка и ревизия ТВС [8].

Для этой группы режимов выполняются требования недопустимости заклинивания ПС СУЗ в направляющих каналах и обеспечение возможности разборки активной зоны.

Требование о недопустимости заклинивания ПС СУЗ распространяются на все режимы.

Наряду с расчетным подтверждением прочности и устойчивости ТВС, проведена экспериментальная проверка путем имитации аварийных нагрузок, условий закрепления ТВС и температурных воздействий. Проведенные испытания подтверждают выполнение указанных требований [1].

Конструкция твэла разработана с учетом влияния облучения на материалы, внешнего и внутреннего давления, явлений уплотнений и набухания топлива, ползучести оболочки, циклического изменения температуры, вибрации, вызванной потоком теплоносителя [8].

В основу проекта положены результаты стендовых и петлевых испытаний, опыта эксплуатации твэлов реакторов-прототипов ВВЭР-1000, расчетных работ и анализа мировой практики.

Геометрия (размеры твэлов и их расположение в ТВС) определяются с учетом заданных физических и теплофизических свойств ТВС. Твэлы в ТВС находятся в положении, определяемом дистанционирующими решетками. Дистанционирующая решетка представляет собой достаточно жесткую конструкцию, обеспечивающую стабильность размеров между твэлами в процессе эксплуатации. В то же время, она достаточно податлива, чтобы

обеспечить возможность радиального расширения твэлов под воздействием температуры и облучения. Нижняя заглушка твэл закреплена в нижней решетке пучка твэл, что гарантирует не всплытие твэла в потоке теплоносителя. Фиксация твэла в ячейках дистанционирующих решеток надежна. Это, а также шаг расположения дистанционирующих решеток, обеспечивают отсутствие повреждений оболочек в местах их контакта с ячейками дистанционирующих решеток [1, 10].

Компенсация радиального расширения твэлов под влиянием температуры и облучения осуществляется за счёт упругости ячеек дистанционирующих решеток, при этом габаритные размеры решеток не изменяются [9].

Для обеспечения свободного удлинения твэлов предусмотрен зазор между пучком твэлов и головкой кассеты.

Конструкция ПС СУЗ и ТВС обеспечивает возможность перемещения ПС СУЗ при наихудших сочетаниях допусков в направляющих каналах ТВС и реактора за счет ориентации головки ТВС блоком защитных труб и за счет радиальных зазоров. ПС СУЗ свободно перемещается в направляющих каналах по всей высоте активной зоны. К поглощающим элементам (ПЭЛ) и стержням выгорающего поглотителя (СВП) предъявляются требования прямолинейности и не превышения размера наружного диаметра в заданных допусках [6].

Совпадение головки ПС СУЗ и пучка СВП с направляющими каналами БЗТ осуществляется путем ориентации ТВС в плане с помощью шпонок на головке ТВС.

Пучок СВП в кассете неподвижен и поджимается к головке ТВС плитой БЗТ.

Для обеспечения возможности осевого расширения ПЭЛ (СВП) и предотвращения «утыкания» концевых элементов ПЭЛ (СВП) в наконечники направляющих каналов предусмотрен компенсационный зазор. Аксиальное и радиальное расширение ПЭЛ (СВП) определяется свойствами материала оболочки [5].

Охлаждение ПЭЛ (СВП) осуществляется теплоносителем, поступающим в кольцевой зазор между направляющим каналом кассеты и ПЭЛ (СВП) через отверстия в наконечниках направляющих каналов. Результаты экспериментальных исследований температурного режима ПЭЛ (СВП) при нарушении нормальных условия охлаждения показали, что надежное охлаждение ПЭЛ (СВП) осуществляется даже при значительном снижении потока теплоносителя в направляющем канале кассеты [5].

Изменение размеров ПЭЛ в результате облучения за срок службы ПС СУЗ не происходит, воздействие поглотителя на оболочку ПЭЛ отсутствует. Опыт эксплуатации ПС СУЗ на действующих реакторах подтверждает их высокую работоспособность и надежность в пределах срока службы ПС СУЗ [8].

В конструкции ТВС, ПС СУЗ и пучка СВП используются следующие конструкционные материалы: нержавеющая сталь типа 08X18H10T, циркониевый сплав $Zr+1\% Nb$, хромоникелевые сплавы ХН77ТЮР и 46ХНМУ [2].

Из циркониевого сплава выполнены оболочка и концевые детали ТВЭЛОВ, центральная труба, направляющие канаты, канал для КНИТ, дистанционирующие решетки, оболочка и переходные элементы СВП. Материал пружин — сплав ХН77ТЮР. Материал оболочки и концевых элементов ПЭЛ — сплав 46ХНМУ. Головка и хвостовик ТВС, головки ПС СУЗ и пучка СВП выполнены из стали типа 08X18H10T [2].

Сталь 08X18H10T отличается стабильностью механических характеристик, включая коэффициент относительной деформации в условиях интенсивного нейтронного облучения, обладает высокими технологическими свойствами. Она широко используется в ядерной энергетике, в том числе в конструкциях ТВС реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, по которым накоплен большой положительный опыт эксплуатации [2].

Для дистанционирующих решеток выбор циркониевого сплава $Zr + 1\% Nb$ обусловлен оптимальным сочетанием его физико-механических

свойств: низким сечением поглощения нейтронов, способностью сохранять достаточную упругость ячеек для фиксации ТВЭЛов в течение проектного срока службы и обеспечивать сохранность геометрии ТВС в заданных размерах при проектных условиях эксплуатации и транспортно-технологических операциях [6].

1.2 Проектные основы

Приведенные ниже проектные основы вытекают из требований нормативно-технической документации ГАН РФ, а также рекомендаций МАГАТЭ.

В начале каждой топливной загрузки должен быть обеспечен достаточный запас реактивности для осуществления работы реактора на номинальной мощности между перегрузками в течение не менее 7000 эффективных часов без превышения установленных в проекте топлива пределов по выгоранию.

Действие внутренних ядерных обратных связей активной зоны должно быть направлено на компенсацию быстрых изменений реактивности и ограничение роста мощности реактора. Коэффициенты реактивности по температуре топлива, по температуре теплоносителя (являющегося также и замедлителем) и по тепловой мощности реактора должны быть отрицательными. Коэффициент реактивности по плотности теплоносителя должен быть положительным [4].

В условиях нормальной эксплуатации должно обеспечиваться [5]:

– непревышение для работы в базовом режиме максимально допустимого значения линейного энерговыделения ТВЭЛов, равного 448 Вт/см. Данное условие должно выполняться с учетом неопределенности, связанной с определением и поддержанием тепловой мощности реактора, составляющей 4 %, и неопределенности, обусловленной технологическими допусками изготовления топлива, учитываемой инженерным коэффициентом запаса,

включая локальные всплески энерговыделения из-за зазоров между топливными таблетками и расчетные погрешности;

– распределение энерговыделения, удовлетворяющее требованиям теплотехнической надежности активной зоны и механической целостности топливных элементов.

Скорость введения реактивности из-за выброса одиночного ПС СУЗ, неуправляемого извлечения с рабочей скоростью регулирующих групп ПС СУЗ, а также при разбавлении бора в теплоносителе должна быть ограничена.

При нормальной эксплуатации на мощности и при отклонении от нормальной эксплуатации, связанной с извлечением группы ПС СУЗ и разбавлением бора, максимальная скорость введения реактивности не должна превышать $0,07 \beta_{\text{эфф}}/\text{с}$, где $\beta_{\text{эфф}}$ представляет эффективную долю запаздывающих нейтронов [3].

Максимальная эффективность отдельных ПС СУЗ должна быть ограничена таким образом, чтобы с учетом действия аварийной защиты реактора в аварии с выбросом ПС СУЗ обеспечивалось не превышение установленных пределов для топлива, сохранение границ давления первого контура, эффективное охлаждение активной зоны в аварии.

Эффективность и быстродействие аварийной защиты должны обеспечивать перевод реактора в подкритическое состояние в любой момент работы реактора с любого энергетического уровня мощности с учетом застревания в крайнем верхнем положении одного наиболее эффективного ПС СУЗ и поддерживать подкритичность во всем диапазоне температур в процессе аварийного расхолаживания реактора. Температура повторной критичности не превышает 120°C для 1-ой загрузки и снижается для последующих [4].

При любых холодных остановах реактора должно обеспечиваться состояние с эффективным коэффициентом размножения не более 0,95 за счет стояночной концентрации борной кислоты в теплоносителе при условии отсутствия ПС СУЗ в активной зоне.

Активная зона должна быть внутренне стабильной по отношению к возмущениям мощности реактора. Возможные пространственные колебания распределения энерговыделения на постоянной мощности должны своевременно контролироваться и подавляться.

1.3 Описание программы WIMS-D5

Программа WIMS-D5 (Winfrith Improved Multigroup Scheme, версии D5) предназначена для нейтронно-физического расчета ячеек ядерных реакторов различного типа (включая расчет выгорания). Данная программа была передана в Россию в конце 1977 г, а в сентябре 1990 г. она была адаптирована для персональных компьютеров.

Программа WIMS (написана на языке ФОРТРАН) – хорошо известная английская программа, предназначенная для детального, нейтронно-физического расчета ячеек реакторов различных типов, в том числе и с учетом выгорания. Программа применяется для расчетов тепловых и быстрых реакторов. Она успешно применяется и для проектирования реакторов, и для расчетов и анализа различных эффектов в существующих реакторах [9].

В настоящее время программа использует универсальную 69-групповую библиотеку констант, подготовленную на основе файлов оцененных нейтронных данных (ENDF, JEF, JENDL) в ГНЦ РФ ФЭИ.

Требуемая входная информация сравнительно невелика по объему. Входная информация вводится в достаточно простой форме и содержит описание рассматриваемого варианта, т.е. сведения о материалах и геометрии ячейки. Программа дает возможность пользователю выбирать на разных этапах расчета различные физические модели и методы решения.

В программе предусмотрен очень подробный вывод результатов. Вывод производится по частям (сегментам, блокам), причем пользователю предоставлена возможность выбора, какие блоки и с какой детальностью

требуется выводить на печать.

Библиотека констант содержит 90 нуклидов. Для некоторых из них имеются наборы микроконстант, полученных по разным теоретическим моделям. Разные наборы констант имеются для водорода, бора, изотопов урана и плутония.

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 2 этапа. На первом этапе реальная исходная ячейка преобразуется в четырехзонную (топливо-оболочка-теплоноситель-замедлитель) упрощенную, эквивалентную по площади реальной.

Расчет пространственно-энергетического распределения нейтронов в ячейке реактора 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.

На первом этапе используется метод вероятности первых столкновений (ВПС) для решения уравнения переноса нейтронов в интегральной форме.

На последующих этапах пользователю представляется выбор:

- метод дискретных ординат – DSN – решается уравнение переноса в дифференциальной форме для бесконечных цилиндров или пластин;
- метод вероятности первых столкновений – ВПС – уравнение переноса решается для задач с цилиндрической и плоской геометрий, кластеры,

конечные стержни и пластины; имеются возможности решать задачи в двумерных геометриях (r, ϑ или r, z) и в полиячейках;

При применении опции PERSEUS используется предположение об изотропии углового распределения нейтронов, пересекающих границу рассматриваемой зоны. В опциях PIJ и PRIZE используется непосредственное вычисление интегралов, через которые выражаются вероятности.

Главным назначением опции PIJ является расчет цилиндрических, квадратных и гексагональных кластеров (расчет в двумерной r, ϑ -геометрии).

Точные вероятности столкновений для решения задач в r, z -геометрии выполняются при опции PRIZE. Рассматриваемые ячейки при этом должны обладать осевой симметрией (допустимы пластины, конечные и бесконечные цилиндры).

Предусмотрены возможности расчета возмущенного потока в реакторе при введении различных образцов, расчета различных функционалов, групповых констант ячейки и различных материалов, входящих в ее состав.

Решение системы приведенных уравнений производится итерационным методом, в результате получают плотности потоков нейтронов и значение K_{∞} .

2 Расчетная часть

В данном разделе была построена расчетная модель водо-водяного реактора с использованием «водяных» твэлов в программе WIMS-D5. С использованием этой модели были найдены значения и построены зависимости выгорания U^{235} , и накопления Pu^{239} , Pu^{241} от глубины выгорания, при разной концентрации пароводяной смеси ($\gamma = 1$ и $\gamma = 0,1$ г/см³), и при разном количестве добавления «водяных» твэлов. Так же были найдены и построены зависимости изменения запаса реактивности от глубины выгорания. Расчеты проводились для «холодного» и «горячего» реактора.

2.1 Расчет штатной модели реактора

Для полной наглядности влияния «водяных» твэлов на нейтронно-физические параметры реактора, в первую очередь, были найдены значения штатного реактора, выгорания U^{235} , и накопления Pu^{239} , Pu^{241} , а также изменения запаса реактивности, без добавления «водяных» твэлов.

Результаты расчета штатной модели без добавления «водяных» твэлов в программе WIMS-D5 для «холодного» и «горячего» реактора представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Значения выгорания U^{235} , и накопления Pu^{239} , Pu^{241} от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор			«Горячий» реактор		
	N(U^{235}), яд/см ³	N(Pu^{239}), яд/см ³	N(Pu^{241}), яд/см ³	N(U^{235}), яд/см ³	N(Pu^{239}), яд/см ³	N(Pu^{241}), яд/см ³
0	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$
10	$3,514 \cdot 10^{19}$	$2,380 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^9$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$2,589 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^4$
150	$3,473 \cdot 10^{19}$	$6,336 \cdot 10^{16}$	$1,896 \cdot 10^{12}$	$3,473 \cdot 10^{19}$	$7,536 \cdot 10^{16}$	$3,683 \cdot 10^{12}$
500	$3,378 \cdot 10^{19}$	$4,208 \cdot 10^{17}$	$1,198 \cdot 10^{14}$	$3,379 \cdot 10^{19}$	$4,987 \cdot 10^{17}$	$2,336 \cdot 10^{14}$
1000	$3,245 \cdot 10^{19}$	$9,964 \cdot 10^{17}$	$1,171 \cdot 10^{15}$	$3,248 \cdot 10^{19}$	$1,172 \cdot 10^{18}$	$2,243 \cdot 10^{15}$
2500	$2,875 \cdot 10^{19}$	$2,485 \cdot 10^{18}$	$1,842 \cdot 10^{16}$	$2,888 \cdot 10^{19}$	$2,862 \cdot 10^{18}$	$3,333 \cdot 10^{16}$
5000	$2,337 \cdot 10^{19}$	$4,291 \cdot 10^{18}$	$1,079 \cdot 10^{17}$	$2,373 \cdot 10^{19}$	$4,839 \cdot 10^{18}$	$1,777 \cdot 10^{17}$
10000	$1,502 \cdot 10^{19}$	$6,313 \cdot 10^{18}$	$4,437 \cdot 10^{17}$	$1,585 \cdot 10^{19}$	$6,993 \cdot 10^{18}$	$6,498 \cdot 10^{17}$
15000	$9,014 \cdot 10^{18}$	$7,222 \cdot 10^{18}$	$7,893 \cdot 10^{17}$	$1,021 \cdot 10^{19}$	$8,012 \cdot 10^{18}$	$1,067 \cdot 10^{18}$
20000	$4,981 \cdot 10^{18}$	$7,555 \cdot 10^{18}$	$1,108 \cdot 10^{18}$	$6,302 \cdot 10^{18}$	$8,445 \cdot 10^{18}$	$1,419 \cdot 10^{18}$
25000	$2,537 \cdot 10^{18}$	$7,637 \cdot 10^{18}$	$1,374 \cdot 10^{18}$	$3,728 \cdot 10^{18}$	$8,601 \cdot 10^{18}$	$1,707 \cdot 10^{18}$

Таблица 2 – Значения изменения k_{∞} и реактивности от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор		«Горячий» реактор	
	k_{∞}	ρ , %	k_{∞}	ρ , %
0	1,224	18,272	1,197	16,435
10	1,176	14,993	1,150	13,077
150	1,167	14,286	1,142	12,466
500	1,160	13,768	1,138	12,090
1000	1,138	12,125	1,119	10,658
2500	1,097	8,858	1,085	7,821
5000	1,014	1,383	1,019	1,861
10000	0,932	-7,319	0,957	-4,537
15000	0,861	-16,161	0,902	-10,908
20000	0,809	-23,637	0,858	-16,583
25000	0,776	-28,911	0,826	-21,125

На рисунке 1 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «холодного» реактора.

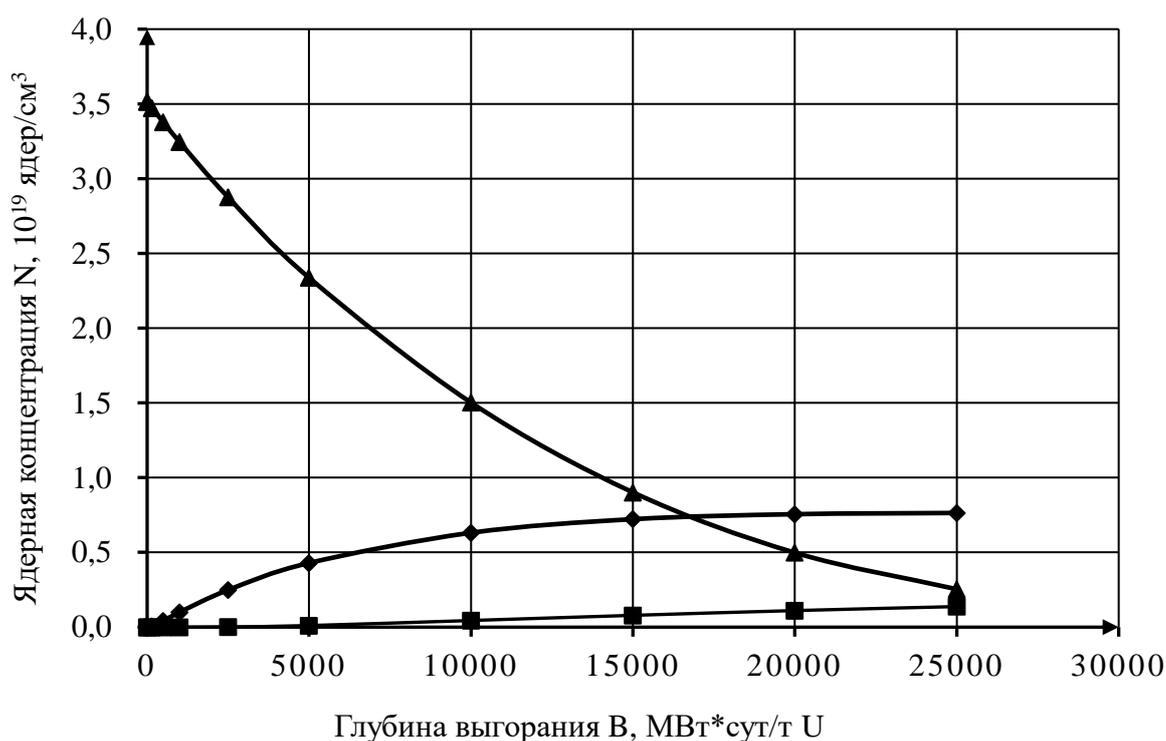


Рисунок 1 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 2 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «горячего» реактора.

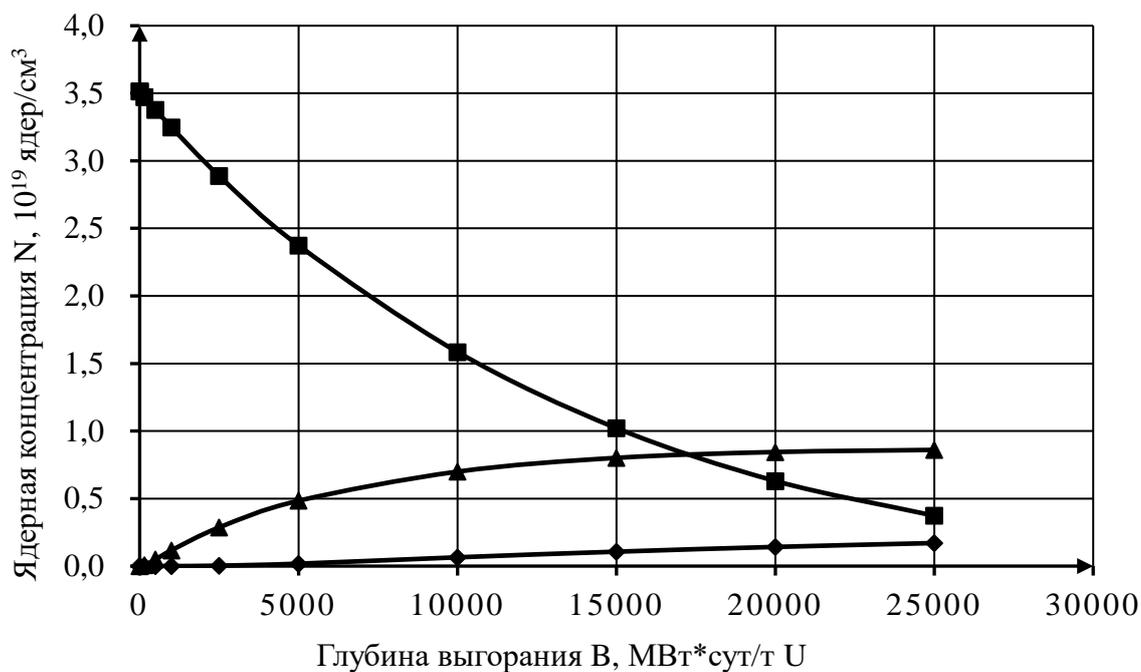


Рисунок 2 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacksquare U^{235} , \blacktriangle Pu^{239} , \blacklozenge Pu^{241} .

Из приведенных графиков на рисунках 1 и 2 можно сделать вывод, что с повышением температуры увеличивается накопление Pu^{239} и Pu^{241} , а также выгорание U^{235} .

На рисунке 3 представлен график зависимости реактивностей от глубины выгорания для «холодного» и «горячего» реактора.

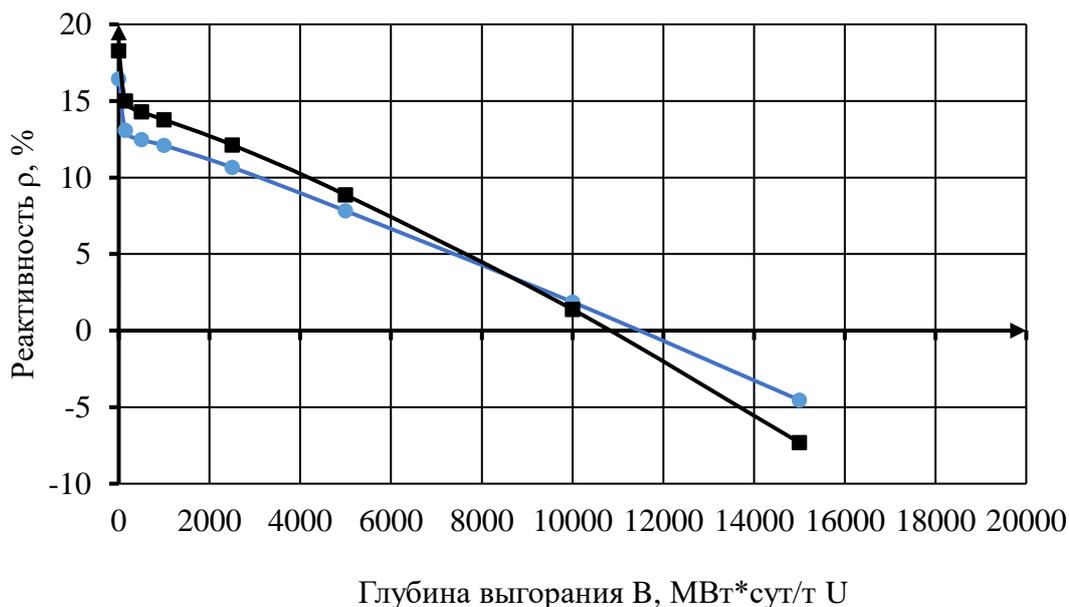


Рисунок 3 – График зависимости реактивностей от глубины выгорания: \blacksquare «холодный» реактор, \blacklozenge «горячий» реактор.

Из приведенной зависимости реактивностей от глубины выгорания можно сделать вывод, что с увеличением температуры реактора его реактивность снижается. Это связано с тем, что с повышением температуры активной зоны реактора, уменьшается плотность замедлителя и увеличивается средняя энергия нейтронов, что приводит к большому захвату нейтронов.

2.2 Расчет модели реактора с добавлением 6 «водяных» ТВЭЛОВ

Часть топливных ТВЭЛОВ в количестве 6 были заменены на «водяные» по которым пускался пароводяной смеси с разной концентрацией ($\gamma = 1$ и $\gamma = 0,1$ г/см³)

Результаты расчета модели реактора с добавлением 6 «водяных» ТВЭЛОВ в программе WIMS-D5 для «холодного» и «горячего» реактора представлены в таблицах 3 и 4.

Расчет производился для пароводяной смеси с концентрацией $\gamma = 1$ г/см³.

Таблица 3 – Значения накопления U²³⁵, Pu²³⁹ и Pu²⁴¹ от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор			«Горячий» реактор		
	N(U ²³⁵), яд/см ³	N(Pu ²³⁹), яд/см ³	N(Pu ²⁴¹), яд/см ³	N(U ²³⁵), яд/см ³	N(Pu ²³⁹), яд/см ³	N(Pu ²⁴¹), яд/см ³
0	3,514·10 ¹⁹	3,514·10 ⁴	3,514·10 ⁴	3,514·10 ¹⁹	3,514·10 ⁴	3,514·10 ⁴
10	3,514·10 ¹⁹	5,932·10 ¹¹	3,514·10 ⁹	3,514·10 ¹⁹	2,406·10 ¹²	3,514·10 ⁴
150	3,473·10 ¹⁹	6,356·10 ¹⁶	1,829·10 ¹²	3,473·10 ¹⁹	7,560·10 ¹⁶	3,602·10 ¹²
500	3,377·10 ¹⁹	4,223·10 ¹⁷	1,158·10 ¹⁴	3,379·10 ¹⁹	5,003·10 ¹⁷	2,296·10 ¹⁴
1000	3,245·10 ¹⁹	1,000·10 ¹⁸	1,134·10 ¹⁵	3,248·10 ¹⁹	1,175·10 ¹⁸	2,209·10 ¹⁵
2500	2,875·10 ¹⁹	2,494·10 ¹⁸	1,793·10 ¹⁶	2,888·10 ¹⁹	2,865·10 ¹⁸	3,297·10 ¹⁶
5000	2,336·10 ¹⁹	4,307·10 ¹⁸	1,063·10 ¹⁷	2,374·10 ¹⁹	4,844·10 ¹⁸	1,772·10 ¹⁷
10000	1,502·10 ¹⁹	6,334·10 ¹⁸	4,427·10 ¹⁷	1,587·10 ¹⁹	7,023·10 ¹⁸	6,531·10 ¹⁷
15000	9,016·10 ¹⁸	7,244·10 ¹⁸	7,930·10 ¹⁷	1,024·10 ¹⁹	8,060·10 ¹⁸	1,076·10 ¹⁸
20000	4,985·10 ¹⁸	7,579·10 ¹⁸	1,115·10 ¹⁸	6,331·10 ¹⁸	8,501·10 ¹⁸	1,432·10 ¹⁸
25000	2,543·10 ¹⁸	7,664·10 ¹⁸	1,383·10 ¹⁸	3,755·10 ¹⁸	8,660·10 ¹⁸	1,721·10 ¹⁸

Таблица 4 – Значения изменения k_∞ и реактивности от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор		«Горячий» реактор	
	k _∞	ρ, %	k _∞	ρ, %
0	1,219	17,973	1,192	16,085
10	1,172	14,686	1,146	12,722
150	1,162	13,977	1,138	12,116

Продолжение таблицы 4

500	1,156	13,458	1,133	11,749
1000	1,134	11,822	1,115	10,333
2500	1,093	8,549	1,081	7,490
5000	1,011	1,050	1,015	1,505
10000	0,929	-7,658	0,953	-4,900
15000	0,858	-16,489	0,899	-11,264
20000	0,807	-23,948	0,855	-16,934
25000	0,774	-29,214	0,823	-21,476

На рисунке 4 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «холодного» реактора.

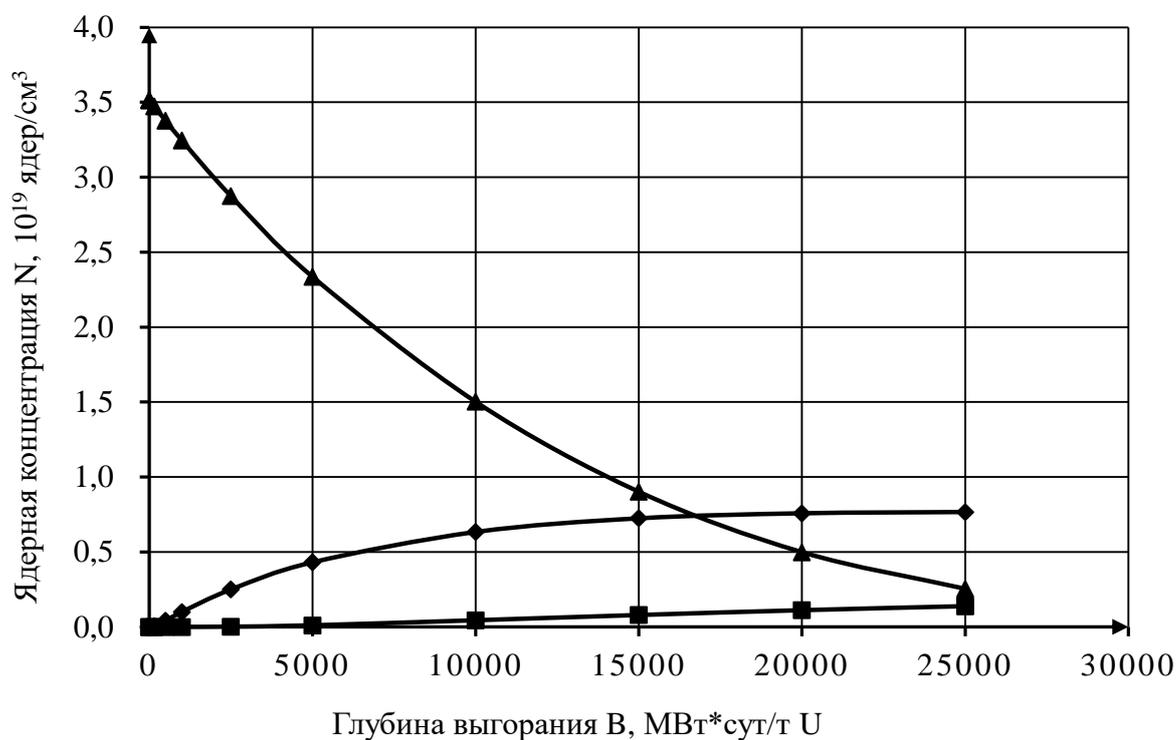


Рисунок 4 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 5 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «горячего» реактора.

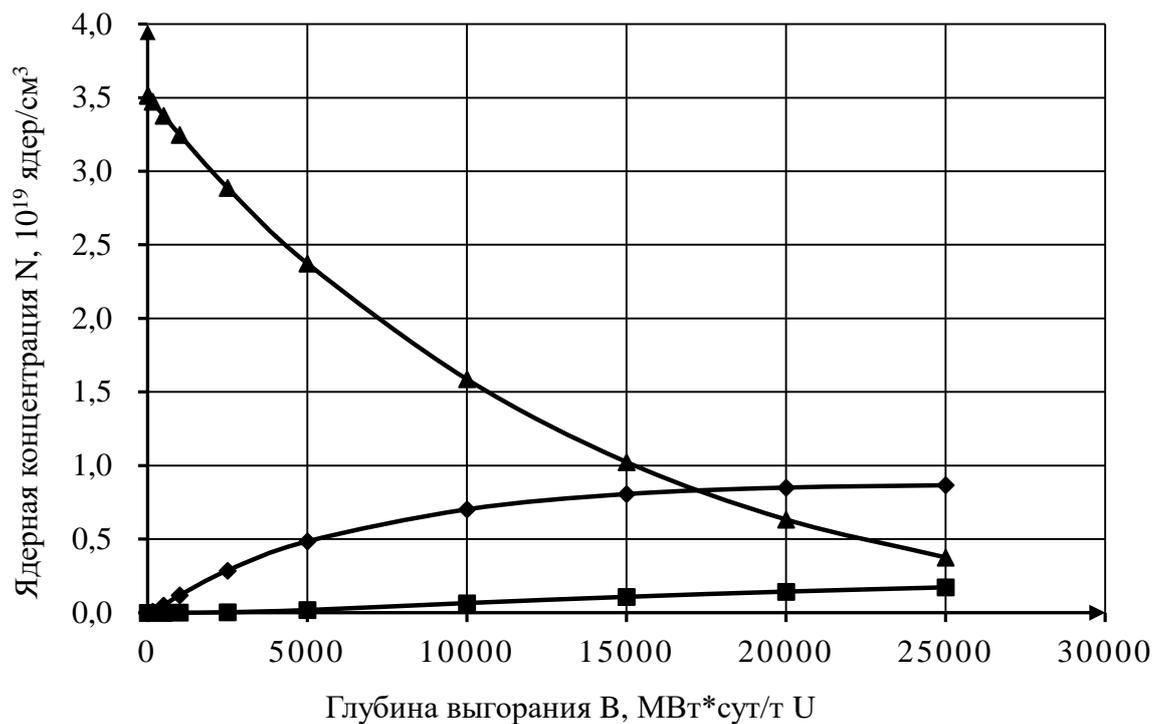


Рисунок 5 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 6 представлен график зависимости реактивностей от глубины выгорания для «холодного» и «горячего» реактора.

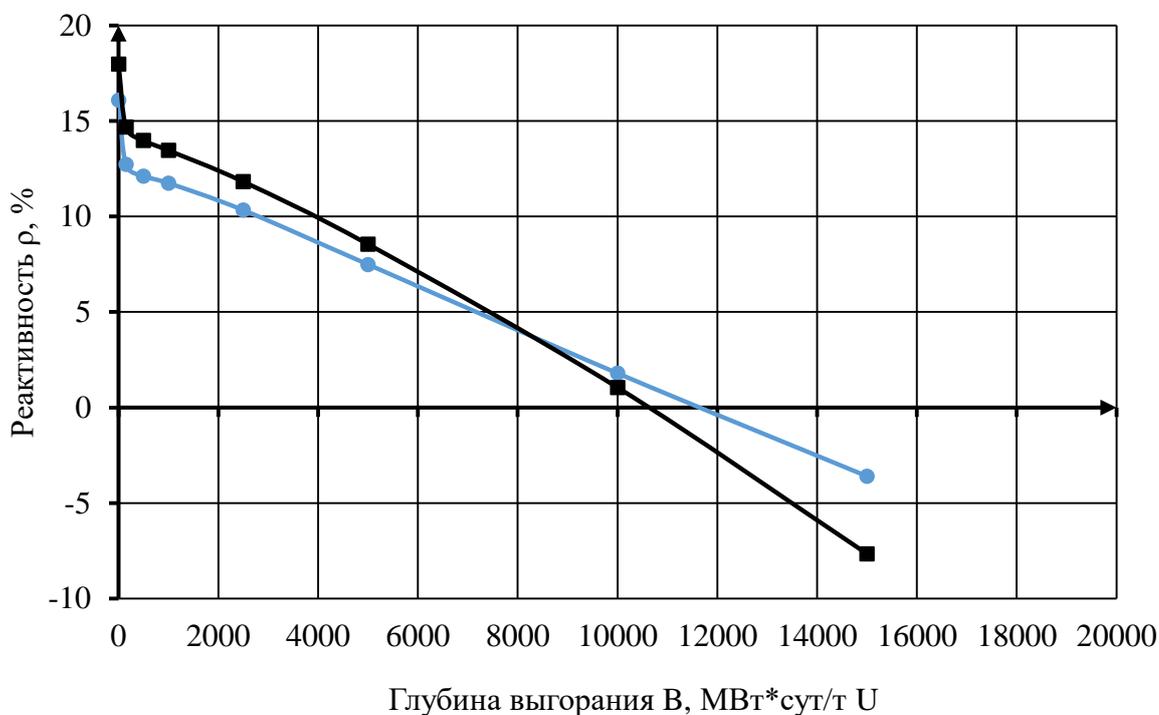


Рисунок 6 – График зависимости реактивностей от глубины выгорания: \blacksquare «холодный» реактор, \blacklozenge «горячий» реактор.

Приведенные зависимости ведут себя аналогичным образом, как и в предыдущем случае со штатной моделью реактора (с повышением температуры увеличивается накопление Pu^{239} и Pu^{241} , и выгорание U^{235}). Так же при добавлении 6 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1 \text{ г/см}^3$, наблюдается повышение выгорания U^{235} , и накопления Pu^{239} и Pu^{241} . Запас реактивности снизился по сравнению со штатной моделью реактора.

Результаты расчета модели реактора с добавлением 6 «водяных» твэлов в программе WIMS-D5 для «холодного» и «горячего» реактора представлены в таблицах 5 и 6.

Расчет производился для пароводяной смеси с концентрацией $\gamma = 0,1 \text{ г/см}^3$.

Таблица 5 – Значения накопления U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор			«Горячий» реактор		
	$N(\text{U}^{235}),$ яд/см ³	$N(\text{Pu}^{239}),$ яд/см ³	$N(\text{Pu}^{241}),$ яд/см ³	$N(\text{U}^{235}),$ яд/см ³	$N(\text{Pu}^{239}),$ яд/см ³	$N(\text{Pu}^{241}),$ яд/см ³
0	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$
10	$3,514 \cdot 10^{19}$	$2,818 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^9$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,010 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^4$
150	$3,473 \cdot 10^{19}$	$6,332 \cdot 10^{16}$	$1,878 \cdot 10^{12}$	$3,473 \cdot 10^{19}$	$7,528 \cdot 10^{16}$	$3,643 \cdot 10^{12}$
500	$3,377 \cdot 10^{19}$	$4,206 \cdot 10^{17}$	$1,187 \cdot 10^{14}$	$3,379 \cdot 10^{19}$	$4,982 \cdot 10^{17}$	$2,314 \cdot 10^{14}$
1000	$3,245 \cdot 10^{19}$	$9,958 \cdot 10^{17}$	$1,161 \cdot 10^{15}$	$3,248 \cdot 10^{19}$	$1,171 \cdot 10^{18}$	$2,223 \cdot 10^{15}$
2500	$2,875 \cdot 10^{19}$	$2,484 \cdot 10^{18}$	$1,828 \cdot 10^{16}$	$2,888 \cdot 10^{19}$	$2,858 \cdot 10^{18}$	$3,309 \cdot 10^{16}$
5000	$2,336 \cdot 10^{19}$	$4,290 \cdot 10^{18}$	$1,075 \cdot 10^{17}$	$2,373 \cdot 10^{19}$	$4,850 \cdot 10^{18}$	$1,770 \cdot 10^{17}$
10000	$1,501 \cdot 10^{19}$	$6,310 \cdot 10^{18}$	$4,433 \cdot 10^{17}$	$1,584 \cdot 10^{19}$	$7,017 \cdot 10^{18}$	$6,491 \cdot 10^{17}$
15000	$9,005 \cdot 10^{18}$	$7,218 \cdot 10^{18}$	$7,898 \cdot 10^{17}$	$1,020 \cdot 10^{19}$	$8,047 \cdot 10^{18}$	$1,067 \cdot 10^{18}$
20000	$4,972 \cdot 10^{18}$	$7,550 \cdot 10^{18}$	$1,109 \cdot 10^{18}$	$6,292 \cdot 10^{18}$	$8,486 \cdot 10^{18}$	$1,420 \cdot 10^{18}$
25000	$2,531 \cdot 10^{18}$	$7,632 \cdot 10^{18}$	$1,375 \cdot 10^{18}$	$3,719 \cdot 10^{18}$	$8,719 \cdot 10^{18}$	$1,708 \cdot 10^{18}$

Таблица 6 – Значения изменения k_{∞} и реактивности от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор		«Горячий» реактор	
	k_{∞}	$\rho, \%$	k_{∞}	$\rho, \%$
0	1,221	18,121	1,195	16,310
10	1,174	14,840	1,149	12,951
150	1,165	14,132	1,141	12,340
500	1,158	13,612	1,136	11,964
1000	1,136	11,965	1,118	10,533
2500	1,095	8,686	1,083	7,688
5000	1,012	1,177	1,017	1,702
10000	0,930	-7,563	0,955	-4,728
15000	0,859	-16,442	0,900	-11,127
20000	0,807	-23,942	0,856	-16,828

Продолжение таблицы 6

25000	0,774	-29,228	0,824	-21,385
-------	-------	---------	-------	---------

На рисунке 7 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «холодного» реактора.

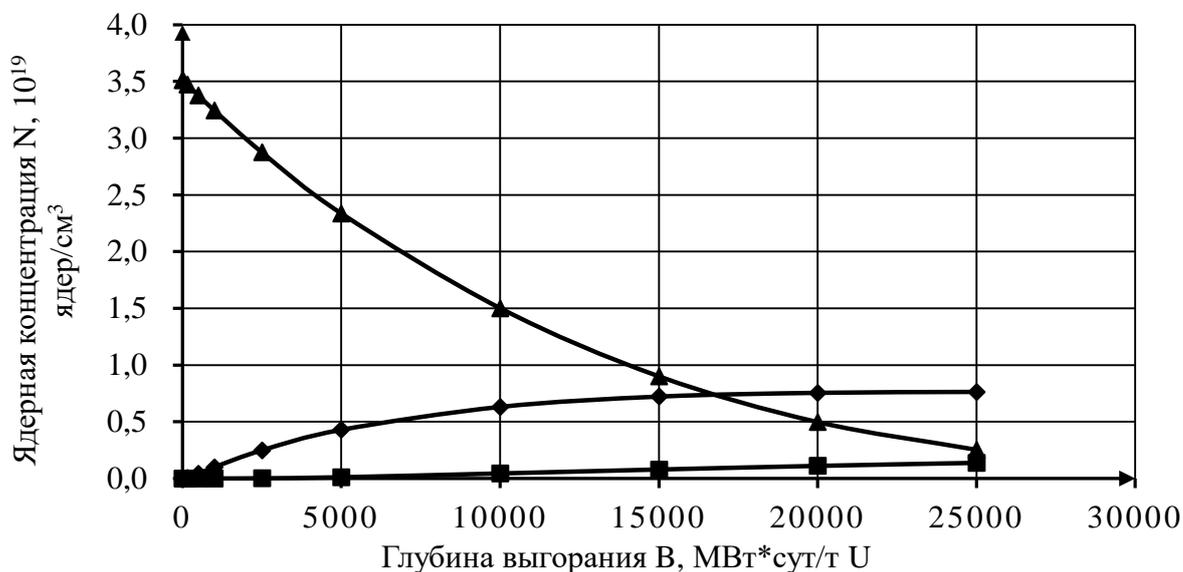


Рисунок 7 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 8 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «горячего» реактора.

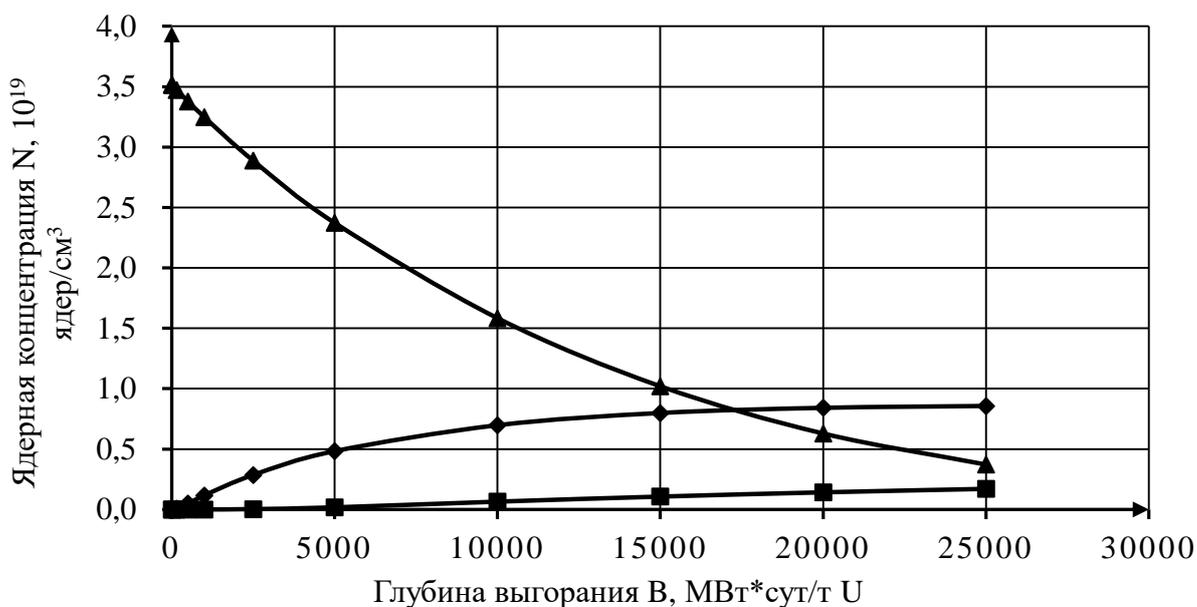


Рисунок 8 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 9 представлен график зависимости реактивностей от глубины выгорания для «холодного» и «горячего» реактора.

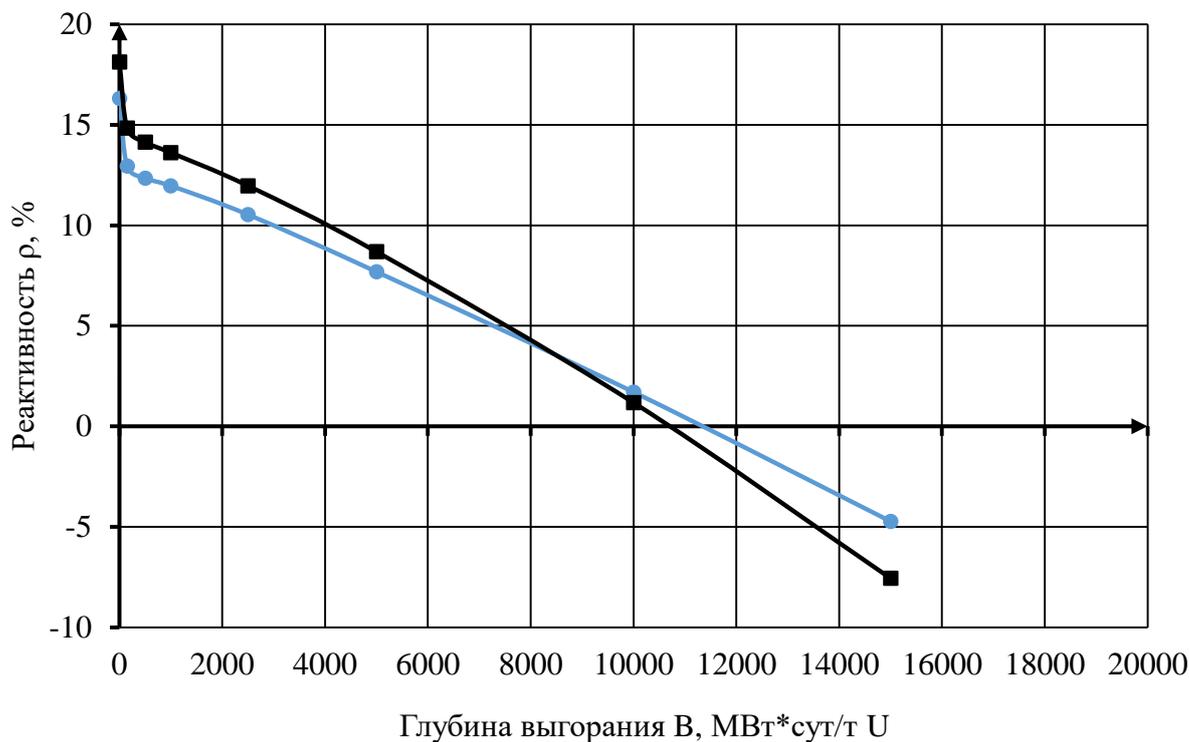


Рисунок 9 – График зависимости реактивностей от глубины выгорания:

■ «холодный» реактор, ● «горячий» реактор.

При уменьшении концентрации пароводяной смеси до $\gamma = 0,1$ г/см³ наблюдается уменьшение выгорания U^{235} , и увеличение накопления Pu^{239} по сравнению с расчетом для 6 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³ и со штатной моделью реактора. Накопление Pu^{241} больше значений штатной модели реактора, но меньше чем при расчете с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³.

Запас реактивности увеличился по сравнению с расчетом для 6 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³. Однако по сравнению с расчетом штатной модели реактора, значение запаса реактивности стало меньше.

2.3 Расчет модели реактора с добавлением 12 «водяных» ТВЭЛОВ

Часть топливных ТВЭЛОВ в количестве 12 были заменены на «водяные» по которым пускался пароводяной смеси с разной концентрацией ($\gamma = 1$ и $\gamma = 0,1$ г/см³)

Результаты расчета модели реактора с добавлением 12 «водяных» ТВЭЛОВ в программе WIMS-D5 для «холодного» и «горячего» реактора представлены в таблицах 7 и 8.

Расчет производился для пароводяной смеси с концентрацией $\gamma = 1$ г/см³.

Таблица 7 – Значения накопления U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор			«Горячий» реактор		
	$N(U^{235})$, яд/см ³	$N(Pu^{239})$, яд/см ³	$N(Pu^{241})$, яд/см ³	$N(U^{235})$, яд/см ³	$N(Pu^{239})$, яд/см ³	$N(Pu^{241})$, яд/см ³
0	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$
10	$3,514 \cdot 10^{19}$	$1,931 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^9$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$1,859 \cdot 10^{10}$	$3,514 \cdot 10^4$
150	$3,473 \cdot 10^{19}$	$6,374 \cdot 10^{16}$	$1,774 \cdot 10^{12}$	$3,473 \cdot 10^{19}$	$7,578 \cdot 10^{16}$	$3,523 \cdot 10^{12}$
500	$3,377 \cdot 10^{19}$	$4,235 \cdot 10^{17}$	$1,124 \cdot 10^{14}$	$3,379 \cdot 10^{19}$	$5,014 \cdot 10^{17}$	$2,256 \cdot 10^{14}$
1000	$3,245 \cdot 10^{19}$	$1,003 \cdot 10^{18}$	$1,103 \cdot 10^{15}$	$3,248 \cdot 10^{19}$	$1,177 \cdot 10^{18}$	$2,176 \cdot 10^{15}$
2500	$2,875 \cdot 10^{19}$	$2,503 \cdot 10^{18}$	$1,751 \cdot 10^{16}$	$2,888 \cdot 10^{19}$	$2,867 \cdot 10^{18}$	$3,259 \cdot 10^{16}$
5000	$2,336 \cdot 10^{19}$	$4,322 \cdot 10^{18}$	$1,049 \cdot 10^{17}$	$2,374 \cdot 10^{19}$	$4,841 \cdot 10^{18}$	$1,766 \cdot 10^{17}$
10000	$1,502 \cdot 10^{19}$	$6,352 \cdot 10^{18}$	$4,420 \cdot 10^{17}$	$1,588 \cdot 10^{19}$	$7,009 \cdot 10^{18}$	$6,555 \cdot 10^{17}$
15000	$9,016 \cdot 10^{18}$	$7,263 \cdot 10^{18}$	$7,968 \cdot 10^{17}$	$1,026 \cdot 10^{19}$	$8,038 \cdot 10^{18}$	$1,085 \cdot 10^{18}$
20000	$4,988 \cdot 10^{18}$	$7,599 \cdot 10^{18}$	$1,122 \cdot 10^{18}$	$6,354 \cdot 10^{18}$	$8,475 \cdot 10^{18}$	$1,444 \cdot 10^{18}$
25000	$2,548 \cdot 10^{18}$	$7,685 \cdot 10^{18}$	$1,392 \cdot 10^{18}$	$3,776 \cdot 10^{18}$	$8,634 \cdot 10^{18}$	$1,734 \cdot 10^{18}$

Таблица 8 – Значения изменения k_{∞} и реактивности от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор		«Горячий» реактор	
	k_{∞}	ρ , %	k_{∞}	ρ , %
0	1,215	17,662	1,187	15,744
10	1,168	14,368	1,141	12,375
150	1,158	13,657	1,133	11,773
500	1,151	13,136	1,129	11,414
1000	1,130	11,503	1,111	10,015
2500	1,090	8,222	1,077	7,163
5000	1,007	0,693	1,012	1,150
10000	0,926	-8,033	0,950	-5,269
15000	0,856	-16,864	0,896	-11,636
20000	0,804	-24,318	0,852	-17,308
25000	0,772	-29,581	0,821	-21,856

На рисунке 10 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «холодного» реактора.

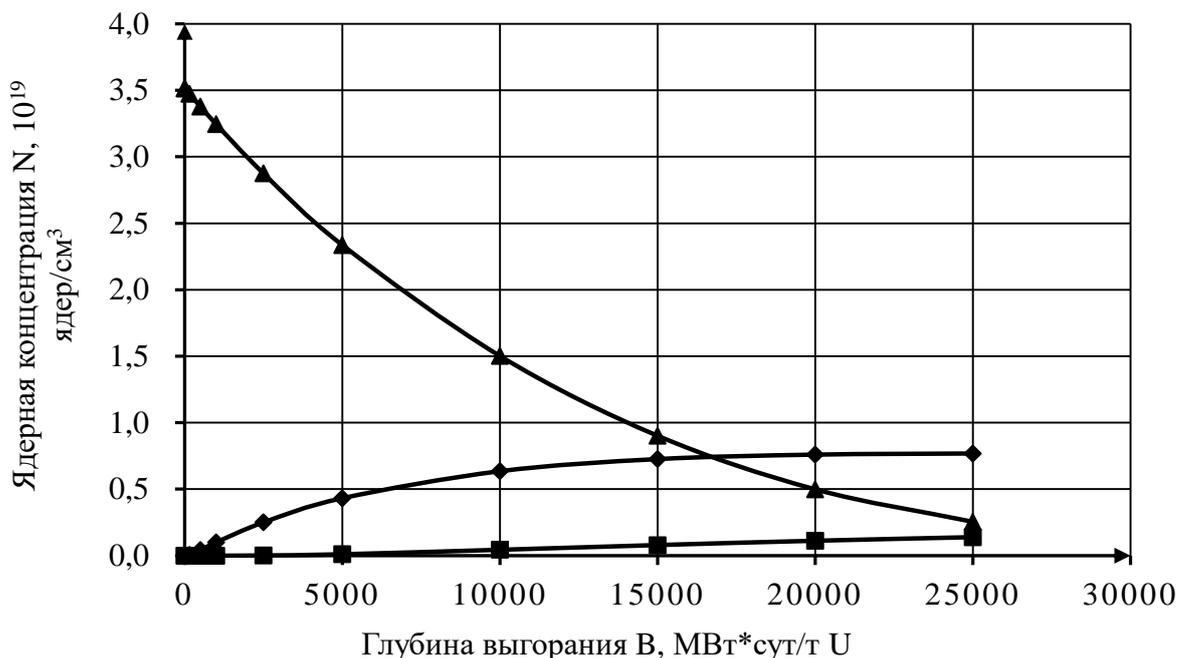


Рисунок 10 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 11 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «горячего» реактора.

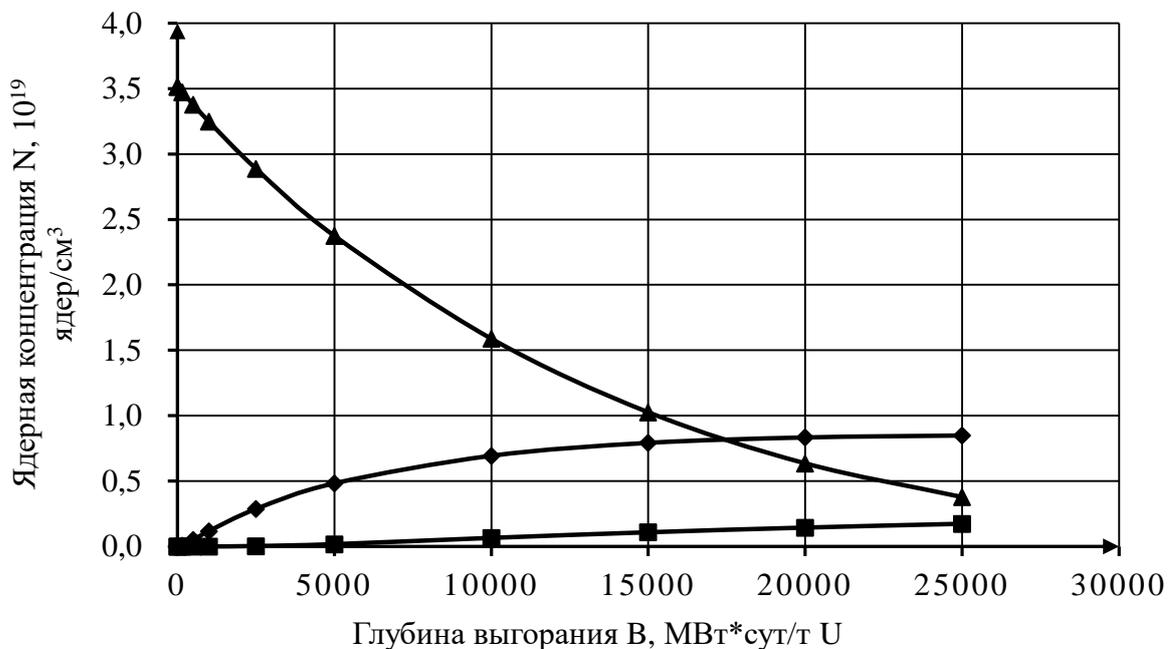


Рисунок 11 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 12 представлен график зависимости реактивностей от глубины выгорания для «холодного» и «горячего» реактора.

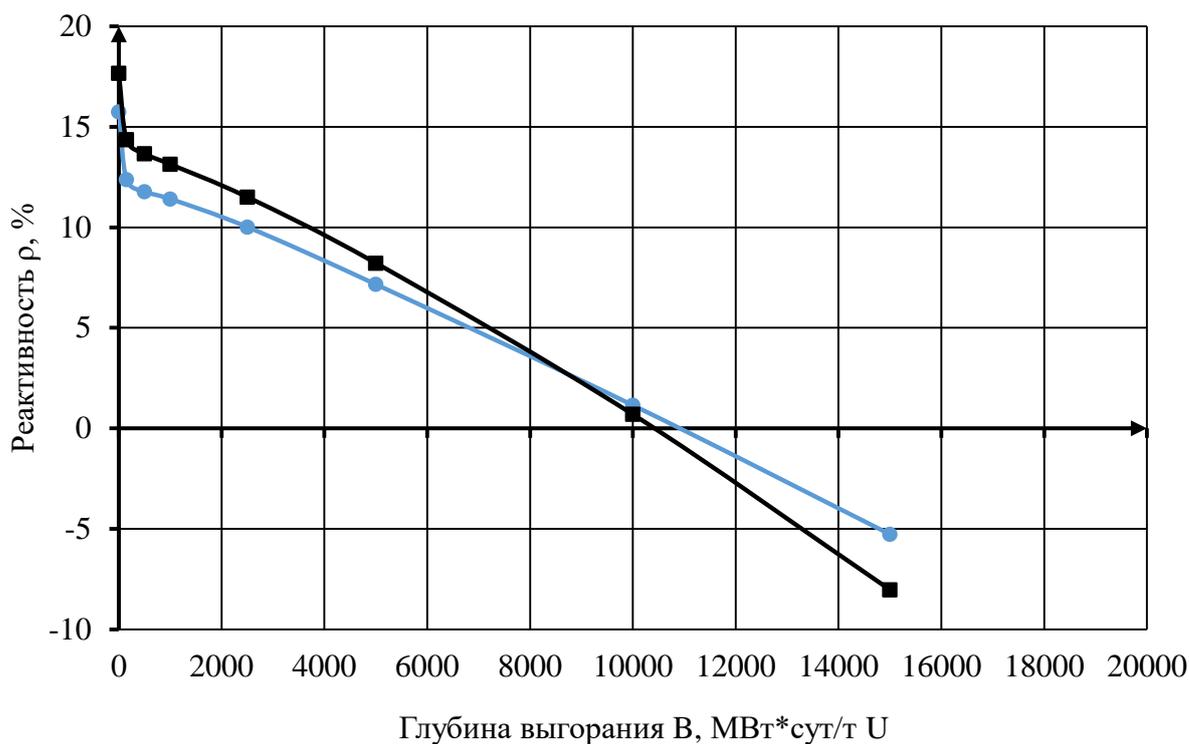


Рисунок 12 – График зависимости реактивностей от глубины выгорания:

■ «холодный» реактор, ◆ «горячий» реактор.

При добавлении 12 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³ наблюдается увеличение выгорания U^{235} и накопления Pu^{239} , Pu^{241} для «холодного» реактора по сравнению с расчетом для 6 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ и 0,1 г/см³, и со штатной моделью реактора. Так же накопление Pu^{239} в «горячем» реакторе больше значений штатной модели реактора, но меньше значений расчета для 6 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ и 0,1 г/см³.

Запас реактивности уменьшился по сравнению с расчетом для штатной модели реактора, а также для 6 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ и 0,1 г/см³.

Результаты расчета модели реактора с добавлением 12 «водяных» ТВЭЛОВ в программе WIMS-D5 для «холодного» и «горячего» реактора представлены в таблицах 9 и 10.

Расчет производился для пароводяной смеси с концентрацией $\gamma = 0,1$ г/см³.

Таблица 9 – Значения накопления U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор			«Горячий» реактор		
	$N(U^{235}),$ яд/см ³	$N(Pu^{239}),$ яд/см ³	$N(Pu^{241}),$ яд/см ³	$N(U^{235}),$ яд/см ³	$N(Pu^{239}),$ яд/см ³	$N(Pu^{241}),$ яд/см ³
0	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$
10	$3,514 \cdot 10^{19}$	$2,291 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^9$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$2,652 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^4$
150	$3,473 \cdot 10^{19}$	$6,327 \cdot 10^{16}$	$1,858 \cdot 10^{12}$	$3,473 \cdot 10^{19}$	$7,518 \cdot 10^{16}$	$3,602 \cdot 10^{12}$
500	$3,377 \cdot 10^{19}$	$4,203 \cdot 10^{17}$	$1,176 \cdot 10^{14}$	$3,379 \cdot 10^{19}$	$4,976 \cdot 10^{17}$	$2,290 \cdot 10^{14}$
1000	$3,245 \cdot 10^{19}$	$9,951 \cdot 10^{17}$	$1,150 \cdot 10^{15}$	$3,248 \cdot 10^{19}$	$1,169 \cdot 10^{18}$	$2,202 \cdot 10^{15}$
2500	$2,875 \cdot 10^{19}$	$2,482 \cdot 10^{18}$	$1,814 \cdot 10^{16}$	$2,888 \cdot 10^{19}$	$2,854 \cdot 10^{18}$	$3,283 \cdot 10^{16}$
5000	$2,336 \cdot 10^{19}$	$4,288 \cdot 10^{18}$	$1,070 \cdot 10^{17}$	$2,372 \cdot 10^{19}$	$4,845 \cdot 10^{18}$	$1,762 \cdot 10^{17}$
10000	$1,501 \cdot 10^{19}$	$6,306 \cdot 10^{18}$	$4,427 \cdot 10^{17}$	$1,583 \cdot 10^{19}$	$7,005 \cdot 10^{18}$	$6,482 \cdot 10^{17}$
15000	$8,966 \cdot 10^{18}$	$7,213 \cdot 10^{18}$	$7,902 \cdot 10^{17}$	$1,019 \cdot 10^{19}$	$8,031 \cdot 10^{18}$	$1,067 \cdot 10^{18}$
20000	$4,963 \cdot 10^{18}$	$7,544 \cdot 10^{18}$	$1,110 \cdot 10^{18}$	$6,281 \cdot 10^{18}$	$8,466 \cdot 10^{18}$	$1,420 \cdot 10^{18}$
25000	$2,524 \cdot 10^{18}$	$7,625 \cdot 10^{18}$	$1,376 \cdot 10^{18}$	$3,709 \cdot 10^{18}$	$8,683 \cdot 10^{18}$	$1,708 \cdot 10^{18}$

Таблица 10 – Значения изменения k_{∞} и реактивности от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор		«Горячий» реактор	
	k_{∞}	$\rho, \%$	k_{∞}	$\rho, \%$
0	1,219	17,959	1,193	16,177
10	1,172	14,676	1,147	12,817
150	1,162	13,966	1,139	12,206
500	1,155	13,443	1,134	11,831
1000	1,134	11,793	1,116	10,402
2500	1,093	8,500	1,082	7,548
5000	1,010	0,957	1,016	1,534
10000	0,927	-7,824	0,953	-4,928
15000	0,857	-16,741	0,898	-11,359
20000	0,805	-24,267	0,854	-17,086
25000	0,772	-29,566	0,822	-21,661

На рисунке 13 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «холодного» реактора.

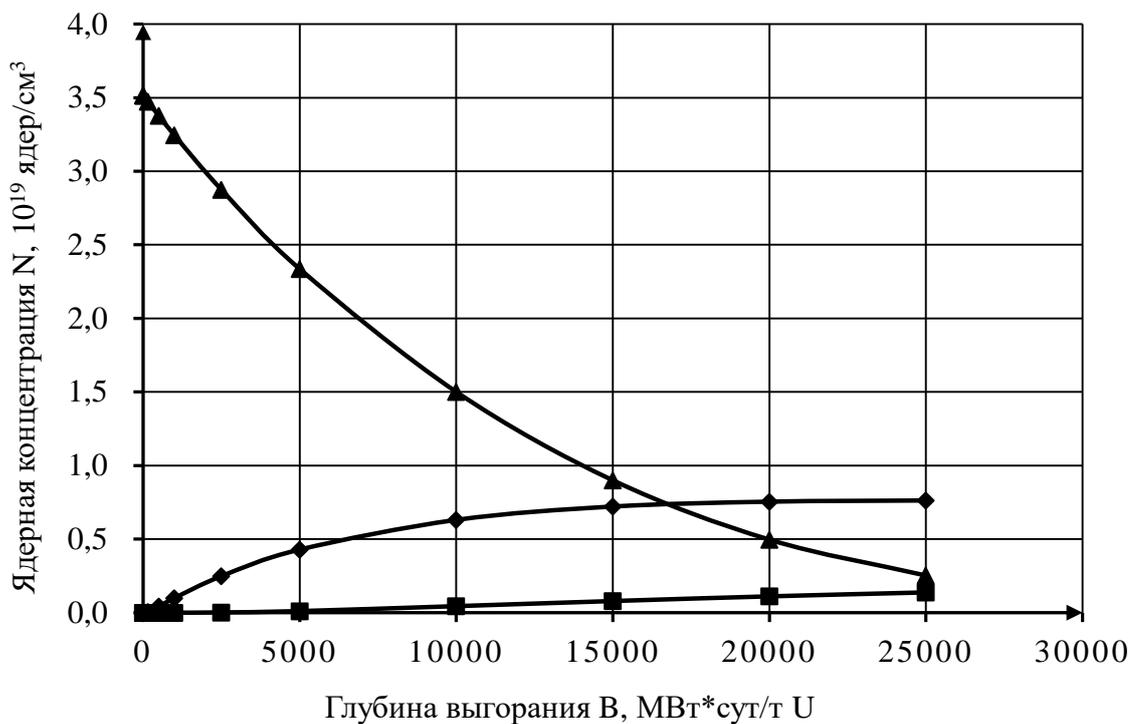


Рисунок 13 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 14 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «горячего» реактора.

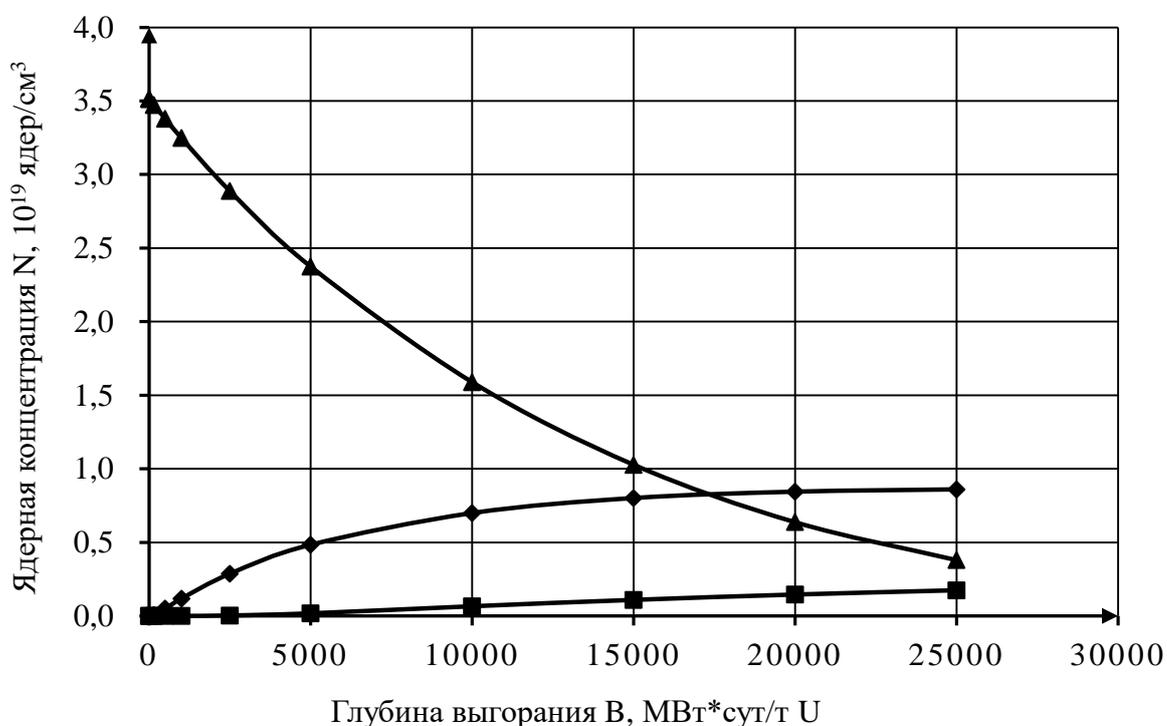


Рисунок 14 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 15 представлен график зависимости реактивностей от глубины выгорания для «холодного» и «горячего» реактора.

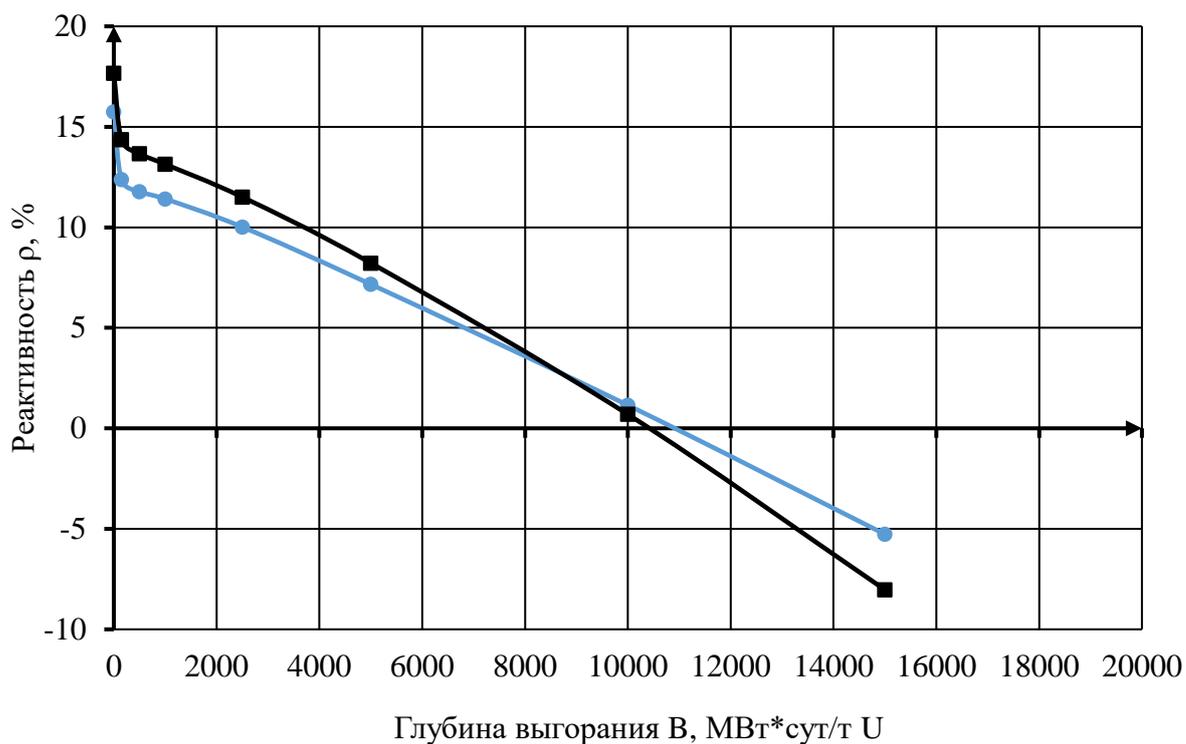


Рисунок 15 – График зависимости реактивностей от глубины выгорания:

■ «холодный» реактор, ◆ «горячий» реактор.

При уменьшении концентрации пароводяной смеси до $\gamma = 0,1$ г/см³ наблюдается уменьшение выгорания U^{235} , и увеличение накопления Pu^{239} по сравнению с расчетом для концентрации пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³, и со штатной моделью реактора. Накопление Pu^{241} больше значений штатной модели реактора, но меньше чем при расчете с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³.

Запас реактивности увеличился по сравнению с расчетом для 12 «водяных» ТВЭЛОВ с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³. Однако по сравнению с расчетом штатной модели реактора, значение запаса реактивности стало немного меньше.

2.4 Расчет модели реактора с добавлением 18 «водяных» ТВЭЛОВ

Часть топливных ТВЭЛОВ в количестве 18 были заменены на «водяные» по которым пускался пароводяной смеси с разной концентрацией ($\gamma = 1$ и $\gamma = 0,1$ г/см³).

Результаты расчета модели реактора с добавлением 18 «водяных» ТВЭЛОВ в программе WIMS-D5 для «холодного» и «горячего» реактора представлены в таблицах 11 и 12.

Расчет производился для пароводяной смеси с концентрацией $\gamma = 1$ г/см³.

Таблица 11 – Значения накопления U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор			«Горячий» реактор		
	$N(U^{235})$, яд/см ³	$N(Pu^{239})$, яд/см ³	$N(Pu^{241})$, яд/см ³	$N(U^{235})$, яд/см ³	$N(Pu^{239})$, яд/см ³	$N(Pu^{241})$, яд/см ³
0	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$
10	$3,514 \cdot 10^{19}$	$1,943 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^9$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$2,324 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^4$
150	$3,473 \cdot 10^{19}$	$6,389 \cdot 10^{16}$	$1,728 \cdot 10^{12}$	$3,473 \cdot 10^{19}$	$7,594 \cdot 10^{16}$	$3,451 \cdot 10^{12}$
500	$3,377 \cdot 10^{19}$	$4,246 \cdot 10^{17}$	$1,096 \cdot 10^{14}$	$3,379 \cdot 10^{19}$	$5,023 \cdot 10^{17}$	$2,217 \cdot 10^{14}$
1000	$3,245 \cdot 10^{19}$	$1,006 \cdot 10^{18}$	$1,076 \cdot 10^{15}$	$3,248 \cdot 10^{19}$	$1,179 \cdot 10^{18}$	$2,144 \cdot 10^{15}$
2500	$2,874 \cdot 10^{19}$	$2,510 \cdot 10^{18}$	$1,715 \cdot 10^{16}$	$2,888 \cdot 10^{19}$	$2,868 \cdot 10^{18}$	$3,222 \cdot 10^{16}$
5000	$2,336 \cdot 10^{19}$	$4,334 \cdot 10^{18}$	$1,037 \cdot 10^{17}$	$2,374 \cdot 10^{19}$	$4,838 \cdot 10^{18}$	$1,758 \cdot 10^{17}$
10000	$1,501 \cdot 10^{19}$	$6,367 \cdot 10^{18}$	$4,417 \cdot 10^{17}$	$1,589 \cdot 10^{19}$	$6,993 \cdot 10^{18}$	$6,575 \cdot 10^{17}$
15000	$9,013 \cdot 10^{18}$	$7,278 \cdot 10^{18}$	$8,008 \cdot 10^{17}$	$1,028 \cdot 10^{19}$	$8,015 \cdot 10^{18}$	$1,092 \cdot 10^{18}$
20000	$4,989 \cdot 10^{18}$	$7,613 \cdot 10^{18}$	$1,129 \cdot 10^{18}$	$6,372 \cdot 10^{18}$	$8,445 \cdot 10^{18}$	$1,454 \cdot 10^{18}$
25000	$2,550 \cdot 10^{18}$	$7,700 \cdot 10^{18}$	$1,400 \cdot 10^{18}$	$3,793 \cdot 10^{18}$	$8,602 \cdot 10^{18}$	$1,745 \cdot 10^{18}$

Таблица 12 – Значения изменения k_{∞} и реактивности от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор		«Горячий» реактор	
	k_{∞}	ρ , %	k_{∞}	ρ , %
0	1,210	17,346	1,182	15,413
10	1,163	14,046	1,137	12,038
150	1,154	13,332	1,129	11,439
500	1,147	12,810	1,125	11,088
1000	1,126	11,178	1,107	9,703
2500	1,086	7,885	1,073	6,843
5000	1,003	0,320	1,008	0,797
10000	0,922	-8,432	0,947	-5,642
15000	0,853	-17,275	0,893	-12,019
20000	0,802	-24,732	0,850	-17,699
25000	0,769	-29,999	0,818	-22,256

На рисунке 16 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «холодного» реактора.

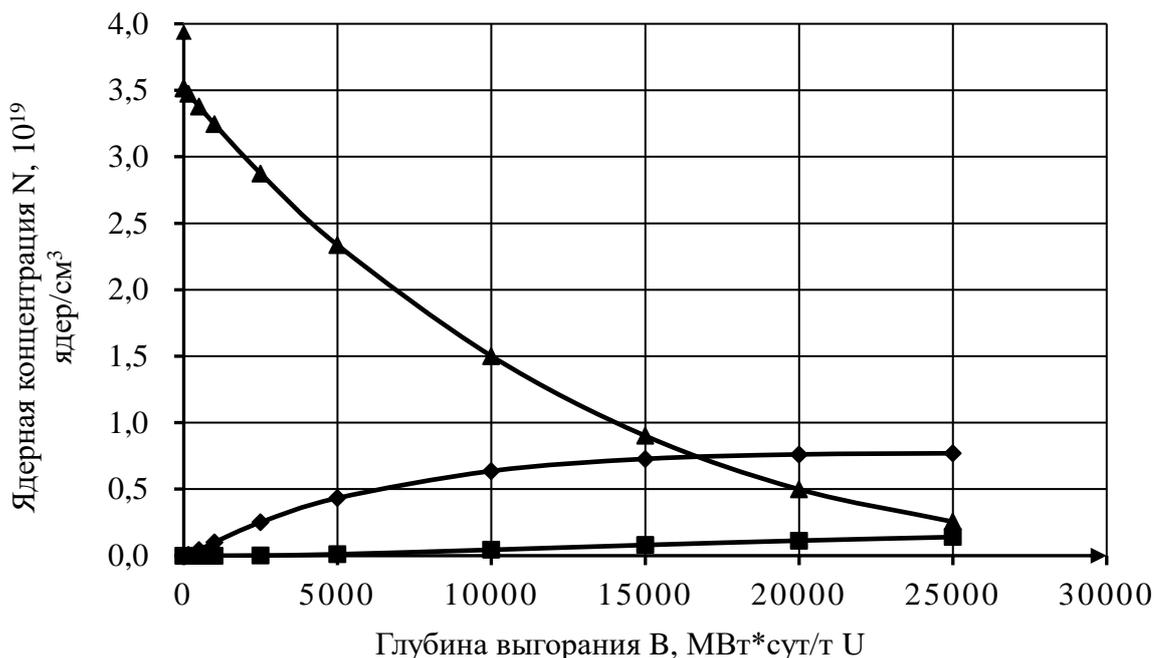


Рисунок 16 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacksquare Pu^{239} , \blacklozenge Pu^{241} .

На рисунке 17 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «горячего» реактора.

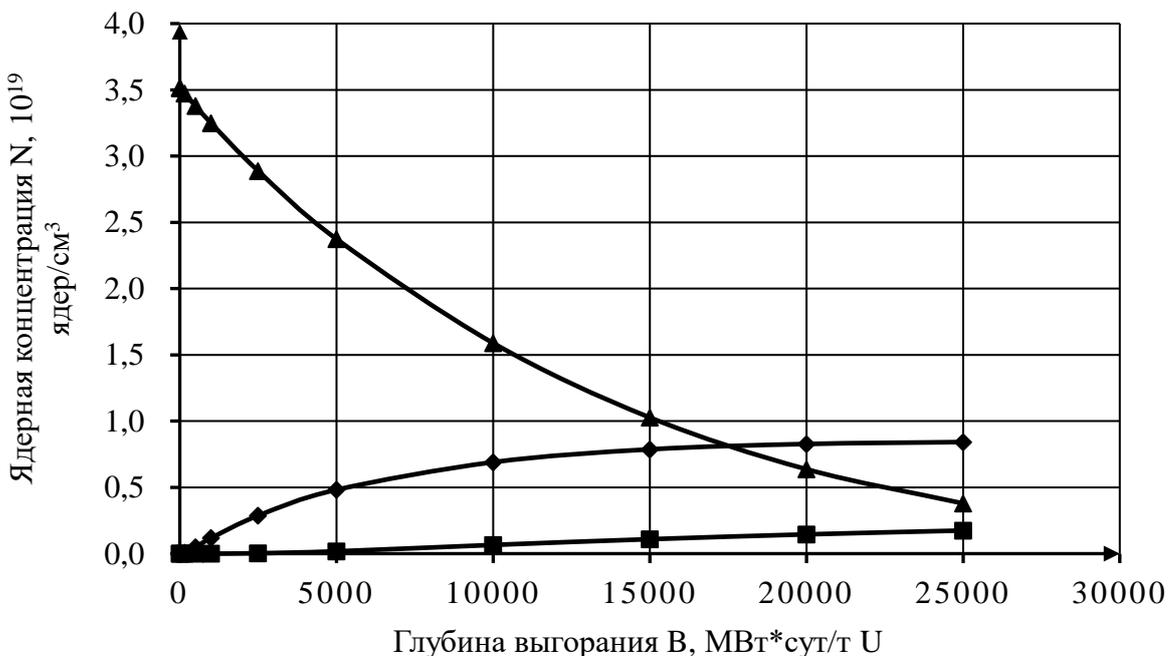


Рисунок 17 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacksquare Pu^{239} , \blacklozenge Pu^{241} .

На рисунке 18 представлен график зависимости реактивностей от глубины выгорания для «холодного» и «горячего» реактора.

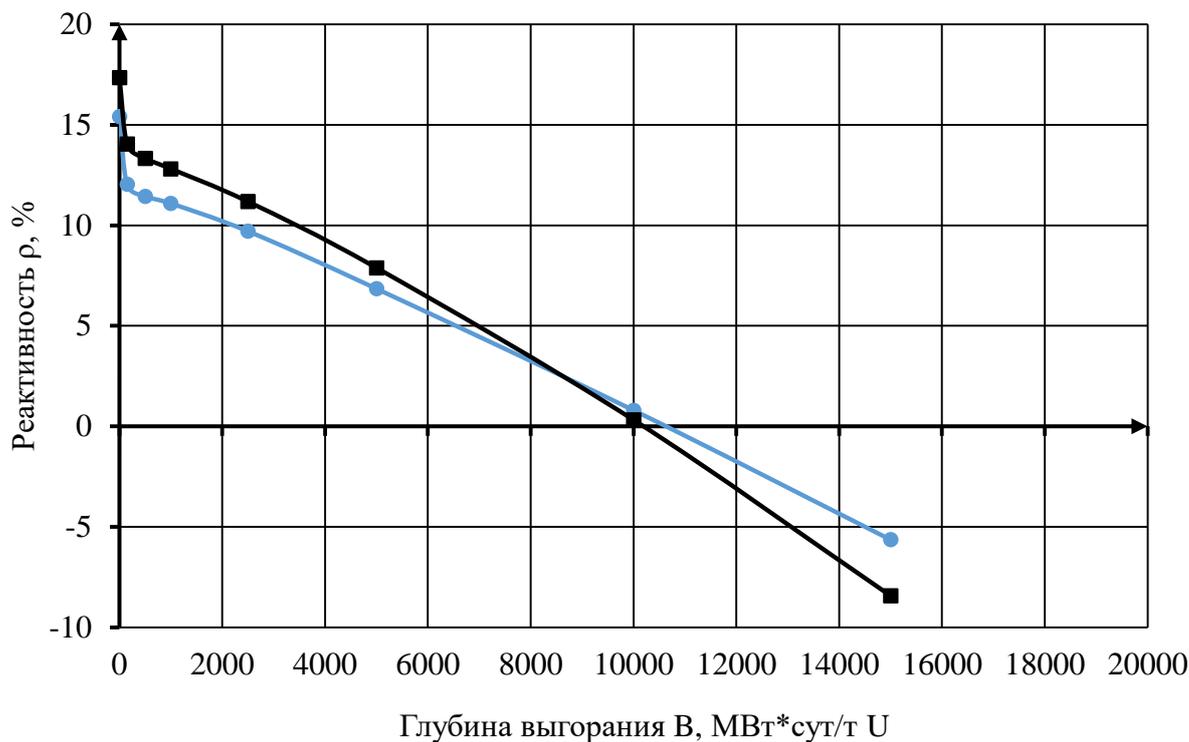


Рисунок 18 – График зависимости реактивностей от глубины выгорания:

■ – «холодный» реактор, ◆ – «горячий» реактор.

При добавлении 18 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1 \text{ г/см}^3$ наблюдается увеличение выгорания U^{235} , и накопления Pu^{239} и Pu^{241} для «холодного» реактора по сравнению с расчетом для 6 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ и $0,1 \text{ г/см}^3$, и со штатной моделью реактора. Так же накопление Pu^{239} в «горячем» реакторе больше значений штатной модели реактора, но меньше значений расчета для 6 и 12 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ и $0,1 \text{ г/см}^3$.

Запас реактивности уменьшился по сравнению с расчетом для штатной модели реактора, а также для 6 «водяных» твэлов с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ и $0,1 \text{ г/см}^3$.

Результаты расчета модели реактора с добавлением 18 «водяных» твэлов в программе WIMS-D5 для «холодного» и «горячего» реактора представлены в таблицах 13 и 14.

Расчет производился для пароводяной смеси с концентрацией $\gamma = 0,1 \text{ г/см}^3$.

Таблица 13 – Значения накопления U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор			«Горячий» реактор		
	$N(U^{235}),$ яд/см ³	$N(Pu^{239}),$ яд/см ³	$N(Pu^{241}),$ яд/см ³	$N(U^{235}),$ яд/см ³	$N(Pu^{239}),$ яд/см ³	$N(Pu^{241}),$ яд/см ³
0	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$3,514 \cdot 10^4$	$3,514 \cdot 10^4$
10	$3,514 \cdot 10^{19}$	$1,921 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^9$	$3,514 \cdot 10^{19}$	$2,315 \cdot 10^{12}$	$3,514 \cdot 10^4$
150	$3,473 \cdot 10^{19}$	$6,321 \cdot 10^{16}$	$1,839 \cdot 10^{12}$	$3,473 \cdot 10^{19}$	$7,508 \cdot 10^{16}$	$3,560 \cdot 10^{12}$
500	$3,377 \cdot 10^{19}$	$4,199 \cdot 10^{17}$	$1,164 \cdot 10^{14}$	$3,379 \cdot 10^{19}$	$4,969 \cdot 10^{17}$	$2,266 \cdot 10^{14}$
1000	$3,245 \cdot 10^{19}$	$9,944 \cdot 10^{17}$	$1,140 \cdot 10^{15}$	$3,248 \cdot 10^{19}$	$1,168 \cdot 10^{18}$	$2,181 \cdot 10^{15}$
2500	$2,875 \cdot 10^{19}$	$2,481 \cdot 10^{18}$	$1,800 \cdot 10^{16}$	$2,887 \cdot 10^{19}$	$2,850 \cdot 10^{18}$	$3,258 \cdot 10^{16}$
5000	$2,335 \cdot 10^{19}$	$4,286 \cdot 10^{18}$	$1,065 \cdot 10^{17}$	$2,372 \cdot 10^{19}$	$4,838 \cdot 10^{18}$	$1,754 \cdot 10^{17}$
10000	$1,500 \cdot 10^{19}$	$6,303 \cdot 10^{18}$	$4,421 \cdot 10^{17}$	$1,583 \cdot 10^{19}$	$6,993 \cdot 10^{18}$	$6,473 \cdot 10^{17}$
15000	$8,986 \cdot 10^{18}$	$7,207 \cdot 10^{18}$	$7,905 \cdot 10^{17}$	$1,018 \cdot 10^{19}$	$8,013 \cdot 10^{18}$	$1,068 \cdot 10^{18}$
20000	$4,954 \cdot 10^{18}$	$7,537 \cdot 10^{18}$	$1,110 \cdot 10^{18}$	$6,270 \cdot 10^{18}$	$8,445 \cdot 10^{18}$	$1,421 \cdot 10^{18}$
25000	$2,516 \cdot 10^{18}$	$7,618 \cdot 10^{18}$	$1,377 \cdot 10^{18}$	$3,699 \cdot 10^{18}$	$8,647 \cdot 10^{18}$	$1,709 \cdot 10^{18}$

Таблица 14 – Значения изменения k_{∞} и реактивности от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор		«Горячий» реактор	
	k_{∞}	$\rho, \%$	k_{∞}	$\rho, \%$
0	1,217	17,346	1,191	16,045
10	1,170	14,046	1,145	12,683
150	1,160	13,332	1,137	12,072
500	1,153	12,810	1,132	11,699
1000	1,131	11,178	1,114	10,271
2500	1,091	7,885	1,080	7,407
5000	1,007	0,320	1,014	1,363
10000	0,925	-8,432	0,951	-5,133
15000	0,854	-17,275	0,896	-11,598
20000	0,803	-24,732	0,852	-17,352
25000	0,770	-29,999	0,820	-21,946

На рисунке 17 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «холодного» реактора.

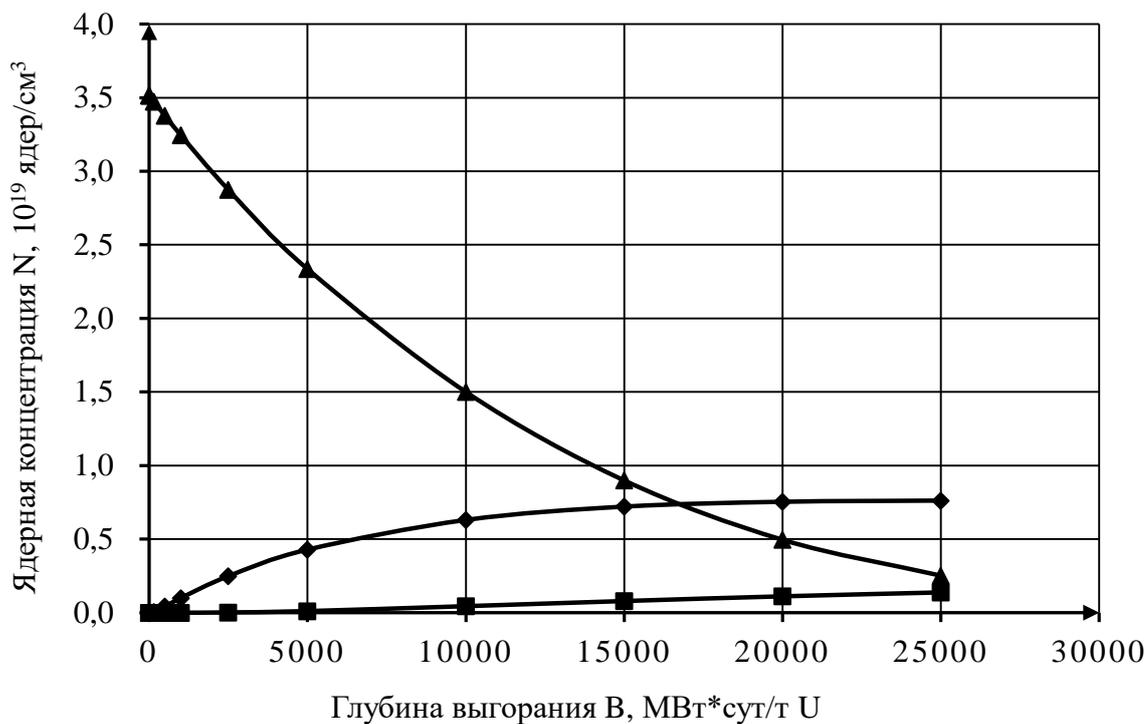


Рисунок 17 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacksquare Pu^{239} , \blacklozenge Pu^{241} .

На рисунке 18 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «горячего» реактора.

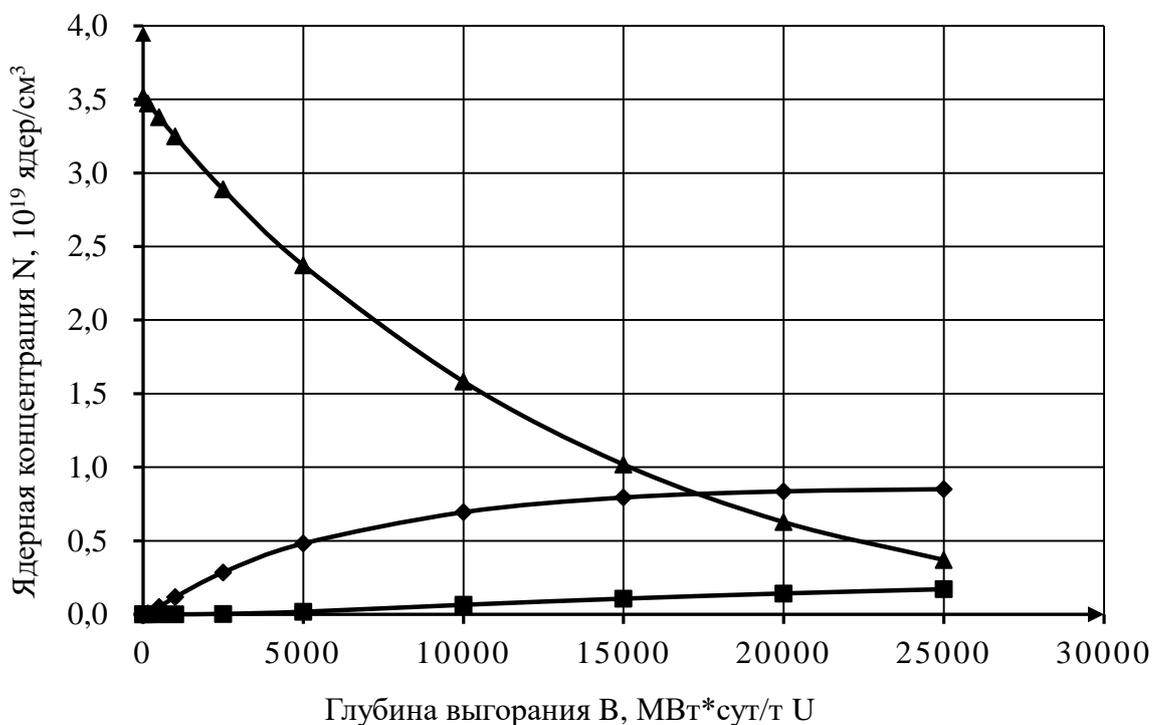


Рисунок 18 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacksquare Pu^{239} , \blacklozenge Pu^{241} .

На рисунке 19 представлен график зависимости реактивностей от глубины выгорания для «холодного» и «горячего» реактора.

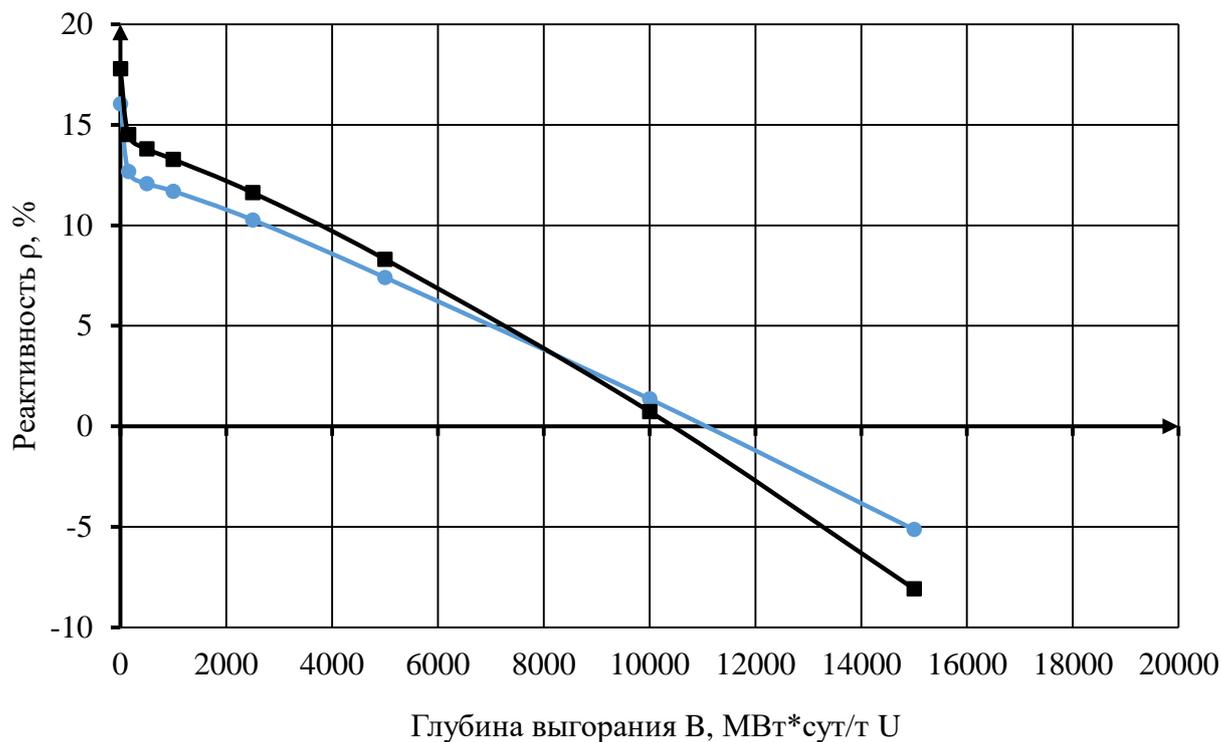


Рисунок 19 – График зависимости реактивностей от глубины выгорания:

■ «холодный» реактор, ● «горячий» реактор.

При уменьшении концентрации пароводяной смеси до $\gamma = 0,1$ г/см³ наблюдается уменьшение выгорания U^{235} , и увеличение накопления Pu^{239} по сравнению с расчетом для концентрации пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³, и со штатной моделью реактора. Накопление Pu^{241} больше значений штатной модели реактора, но меньше чем при расчете с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³.

Запас реактивности увеличился по сравнению с расчетом для 18 «водяных» ТВЭЛОВ с концентрацией пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³. Однако по сравнению с расчетом штатной модели реактора, значение запаса реактивности стало меньше.

2.5 Расчет модели реактора с добавлением 6 «водяных» ТВЭЛОВ с увеличенным обогащением топлива

Так как из каждой ТВС были удалены ТВЭЛЫ, на месте которых были размещены трубки с водяным теплоносителем («водяные» ТВЭЛЫ). Для сохранения размножающих свойств активной зоны одновременно было повышено обогащение топлива (до 2.2 %)

Результаты расчета модели реактора с добавлением 6 «водяных» ТВЭЛОВ в программе WIMS-D5 для «холодного» и «горячего» реактора представлены в таблицах 15 и 16.

Расчет производился для пароводяной смеси с концентрацией $\gamma = 1 \text{ г/см}^3$.

Таблица 15 – Значения накопления U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор			«Горячий» реактор		
	$N(U^{235})$, яд/см ³	$N(Pu^{239})$, яд/см ³	$N(Pu^{241})$, яд/см ³	$N(U^{235})$, яд/см ³	$N(Pu^{239})$, яд/см ³	$N(Pu^{241})$, яд/см ³
0	$4,686 \cdot 10^{19}$	$4,686 \cdot 10^4$	$4,686 \cdot 10^4$	$4,686 \cdot 10^{19}$	$4,686 \cdot 10^4$	$4,686 \cdot 10^4$
10	$4,686 \cdot 10^{19}$	$1,535 \cdot 10^{12}$	$4,685 \cdot 10^4$	$4,686 \cdot 10^{19}$	$1,877 \cdot 10^{12}$	$4,685 \cdot 10^4$
150	$4,644 \cdot 10^{19}$	$5,228 \cdot 10^{16}$	$9,645 \cdot 10^{11}$	$4,645 \cdot 10^{19}$	$6,337 \cdot 10^{16}$	$1,954 \cdot 10^{12}$
500	$4,548 \cdot 10^{19}$	$3,498 \cdot 10^{17}$	$6,075 \cdot 10^{13}$	$4,529 \cdot 10^{19}$	$4,229 \cdot 10^{17}$	$1,239 \cdot 10^{14}$
1000	$4,412 \cdot 10^{19}$	$8,363 \cdot 10^{17}$	$6,022 \cdot 10^{14}$	$4,415 \cdot 10^{19}$	$1,005 \cdot 10^{18}$	$1,214 \cdot 10^{15}$
2500	$4,026 \cdot 10^{19}$	$2,145 \cdot 10^{18}$	$1,002 \cdot 10^{16}$	$4,036 \cdot 10^{19}$	$2,532 \cdot 10^{18}$	$1,933 \cdot 10^{16}$
5000	$3,440 \cdot 10^{19}$	$3,850 \cdot 10^{18}$	$6,581 \cdot 10^{16}$	$3,471 \cdot 10^{19}$	$4,445 \cdot 10^{18}$	$1,171 \cdot 10^{17}$
10000	$2,461 \cdot 10^{19}$	$6,005 \cdot 10^{18}$	$3,182 \cdot 10^{17}$	$2,540 \cdot 10^{19}$	$6,761 \cdot 10^{18}$	$5,036 \cdot 10^{17}$
15000	$1,673 \cdot 10^{19}$	$7,153 \cdot 10^{18}$	$6,291 \cdot 10^{17}$	$1,805 \cdot 10^{19}$	$7,987 \cdot 10^{18}$	$9,127 \cdot 10^{17}$
20000	$1,064 \cdot 10^{19}$	$7,677 \cdot 10^{18}$	$9,424 \cdot 10^{17}$	$1,235 \cdot 10^{19}$	$8,565 \cdot 10^{18}$	$1,284 \cdot 10^{18}$
25000	$6,252 \cdot 10^{18}$	$7,844 \cdot 10^{18}$	$1,228 \cdot 10^{18}$	$8,089 \cdot 10^{18}$	$8,774 \cdot 10^{18}$	$1,600 \cdot 10^{18}$

Таблица 16 – Значения изменения k_{∞} и реактивности от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор		«Горячий» реактор	
	k_{∞}	ρ , %	k_{∞}	ρ , %
0	1,314	23,876	1,280	21,854
10	1,263	20,794	1,230	18,684
150	1,252	20,149	1,220	18,066
500	1,244	19,643	1,214	17,622
1000	1,224	18,270	1,195	16,309
2500	1,186	15,661	1,160	13,814
5000	1,107	9,696	1,094	8,600
10000	1,025	2,439	1,030	2,891
15000	0,943	-6,026	0,968	-3,308

Продолжение таблицы 16

20000	0,812	-14,974	0,912	-9,678
25000	0,812	-23,116	0,864	-15,693

На рисунке 20 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «холодного» реактора.

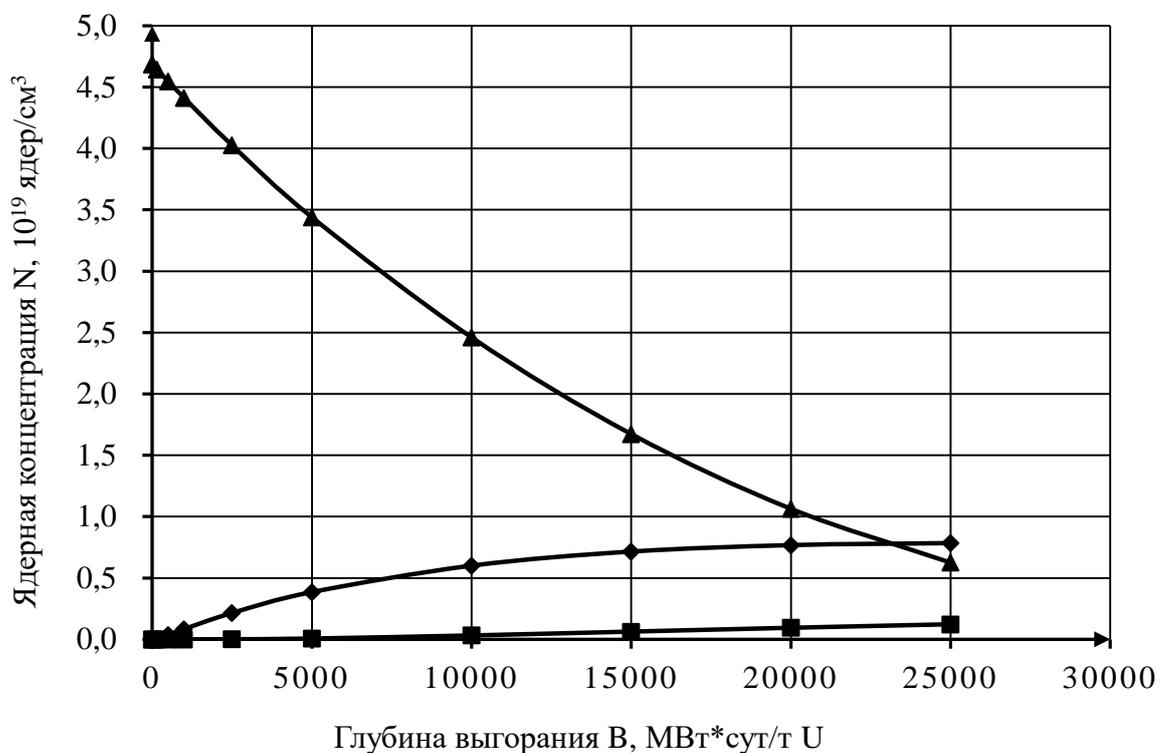


Рисунок 20 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 21 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «горячего» реактора.

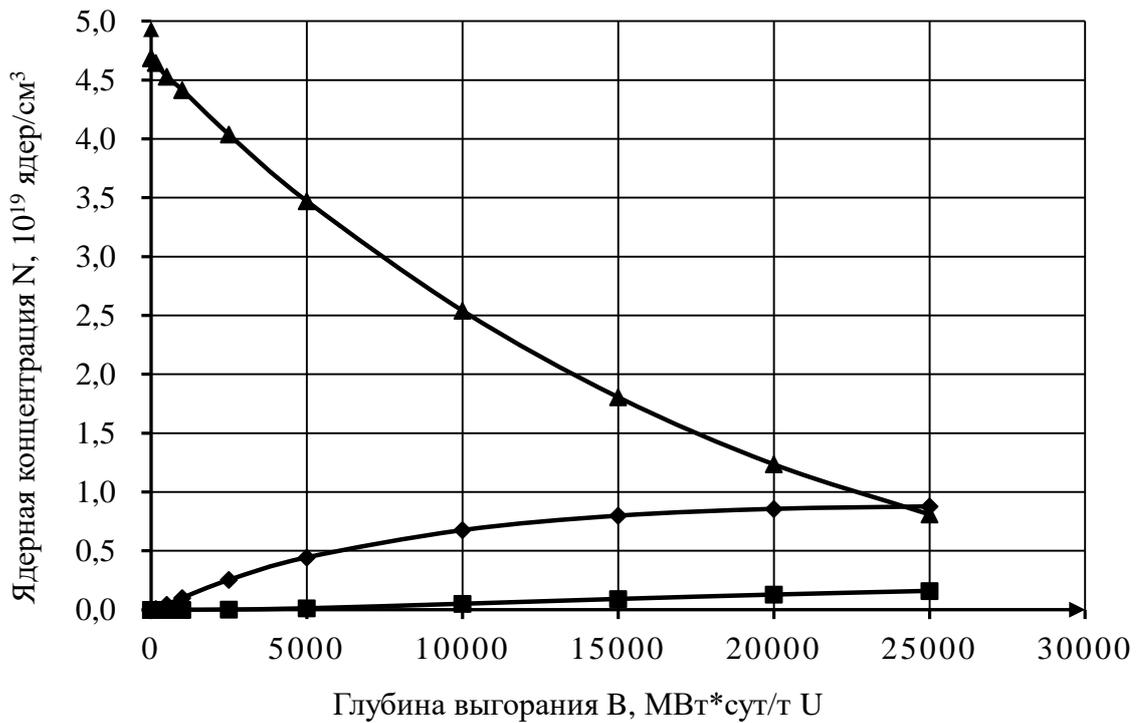


Рисунок 21 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 22 представлен график зависимости реактивностей от глубины выгорания для «холодного» и «горячего» реактора.

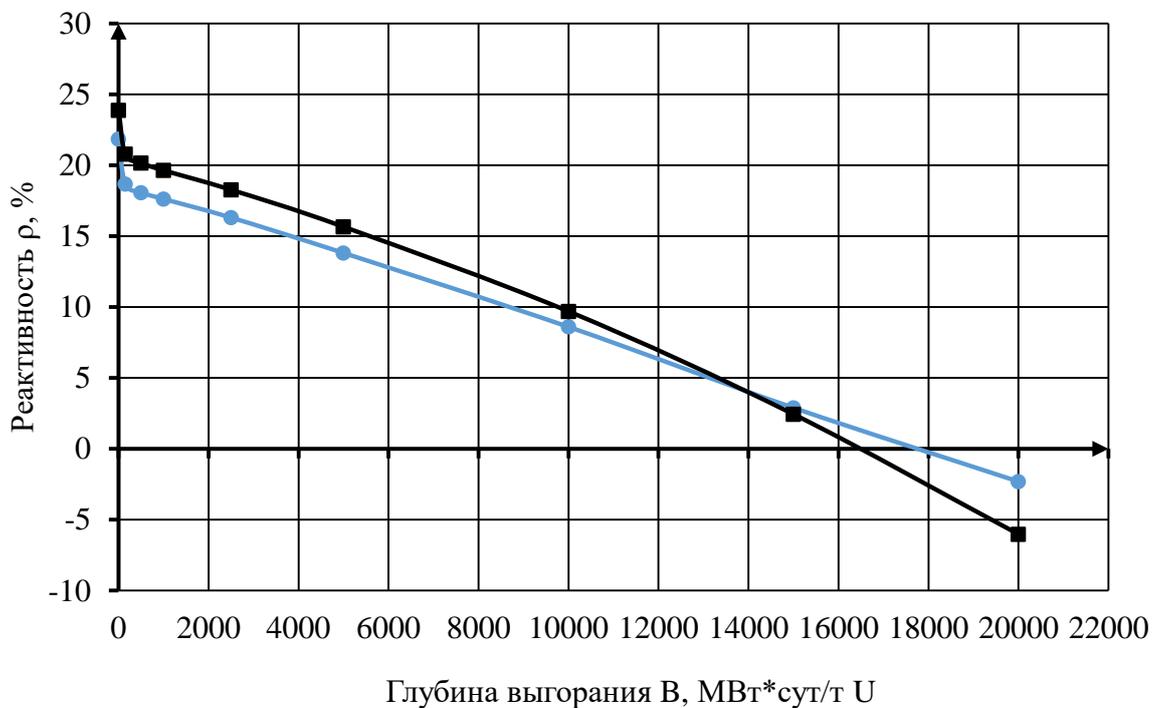


Рисунок 22 – График зависимости реактивностей от глубины выгорания: \blacksquare «холодный» реактор, \blacklozenge «горячий» реактор.

При расчете данной модели реактора с добавлением 6 «водяных» ТВЭЛов с увеличением обогащения до 2,2 и, с концентрацией паро-водяной смеси $\gamma = 1 \text{ г/см}^3$ наблюдается увеличение накопления U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} для «холодного» и «горячего» реактора по сравнению с расчетом штатной модели реактора и с добавлением 6, 12 и 18 «водяных» твэлов.

Запас реактивности увеличился по сравнению с расчетом штатной модели реактора и с добавлением 6, 12 и 18 «водяных» твэлов.

Результаты расчета модели реактора с добавлением 18 «водяных» твэлов в программе WIMS-D5 для «холодного» и «горячего» реактора представлены в таблицах 17 и 18.

Расчет производился для пароводяной смеси с концентрацией $\gamma = 0,1 \text{ г/см}^3$.

Таблица 17 – Значения накопления U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор			«Горячий» реактор		
	$N(U^{235}),$ яд/см ³	$N(Pu^{239}),$ яд/см ³	$N(Pu^{241}),$ яд/см ³	$N(U^{235}),$ яд/см ³	$N(Pu^{239}),$ яд/см ³	$N(Pu^{241}),$ яд/см ³
0	$4,686 \cdot 10^{19}$	$4,686 \cdot 10^4$	$4,686 \cdot 10^4$	$4,686 \cdot 10^{19}$	$4,686 \cdot 10^4$	$4,686 \cdot 10^4$
10	$4,686 \cdot 10^{19}$	$1,528 \cdot 10^{12}$	$4,685 \cdot 10^4$	$4,686 \cdot 10^{19}$	$1,876 \cdot 10^{12}$	$4,685 \cdot 10^4$
150	$4,644 \cdot 10^{19}$	$5,164 \cdot 10^{16}$	$1,021 \cdot 10^{12}$	$4,645 \cdot 10^{19}$	$6,262 \cdot 10^{16}$	$2,013 \cdot 10^{12}$
500	$4,548 \cdot 10^{19}$	$3,454 \cdot 10^{17}$	$6,410 \cdot 10^{13}$	$4,549 \cdot 10^{19}$	$4,181 \cdot 10^{17}$	$1,262 \cdot 10^{14}$
1000	$4,413 \cdot 10^{19}$	$8,258 \cdot 10^{17}$	$6,336 \cdot 10^{14}$	$4,415 \cdot 10^{19}$	$9,945 \cdot 10^{18}$	$1,231 \cdot 10^{15}$
2500	$4,027 \cdot 10^{19}$	$2,119 \cdot 10^{18}$	$1,047 \cdot 10^{16}$	$4,036 \cdot 10^{19}$	$2,512 \cdot 10^{18}$	$1,949 \cdot 10^{16}$
5000	$3,440 \cdot 10^{19}$	$3,805 \cdot 10^{18}$	$3,805 \cdot 10^{16}$	$3,469 \cdot 10^{19}$	$4,431 \cdot 10^{18}$	$1,169 \cdot 10^{17}$
10000	$2,460 \cdot 10^{19}$	$5,943 \cdot 10^{18}$	$3,197 \cdot 10^{17}$	$2,534 \cdot 10^{19}$	$6,783 \cdot 10^{18}$	$4,964 \cdot 10^{17}$
15000	$1,670 \cdot 10^{19}$	$7,084 \cdot 10^{18}$	$6,218 \cdot 10^{17}$	$1,795 \cdot 10^{19}$	$8,042 \cdot 10^{18}$	$8,919 \cdot 10^{17}$
20000	$1,059 \cdot 10^{19}$	$7,603 \cdot 10^{18}$	$9,258 \cdot 10^{17}$	$1,222 \cdot 10^{19}$	$8,641 \cdot 10^{18}$	$1,251 \cdot 10^{18}$
25000	$6,198 \cdot 10^{18}$	$7,763 \cdot 10^{18}$	$1,205 \cdot 10^{18}$	$7,956 \cdot 10^{18}$	$8,857 \cdot 10^{18}$	$1,561 \cdot 10^{18}$

Таблица 18 – Значения изменения k_{∞} и реактивности от глубины выгорания

Выгорание В, МВт·сут/тU	«Холодный» реактор		«Горячий» реактор	
	k_{∞}	$\rho, \%$	k_{∞}	$\rho, \%$
0	1,321	24,291	1,288	22,376
10	1,269	21,221	1,238	19,216
150	1,259	20,575	1,228	18,594
500	1,251	20,070	1,222	18,142
1000	1,230	18,683	1,202	16,809
2500	1,191	16,067	1,167	14,318
5000	1,112	10,107	1,101	9,136
10000	1,029	2,816	1,035	3,408

Продолжение таблицы 18

15000	0,946	-5,726	0,972	-2,852
20000	0,871	-14,788	0,915	-9,303
25000	0,813	-23,028	0,867	-15,390

На рисунке 23 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «холодного» реактора.

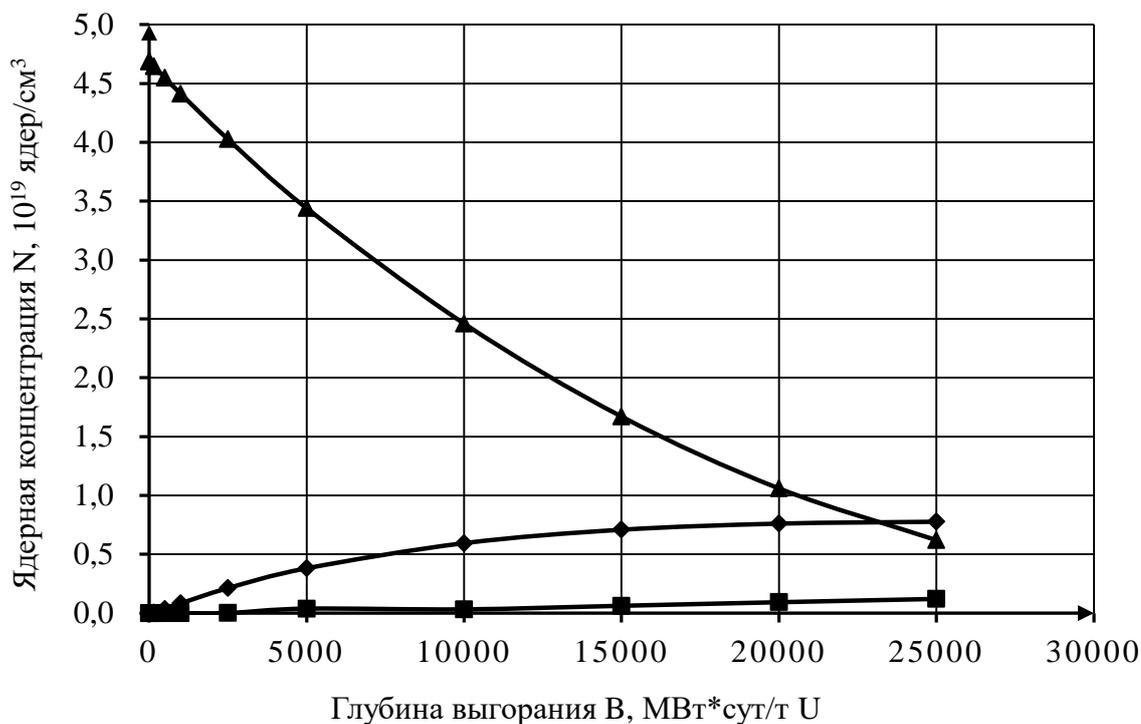


Рисунок 23 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 24 представлен график зависимости ядерных концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания для «горячего» реактора.

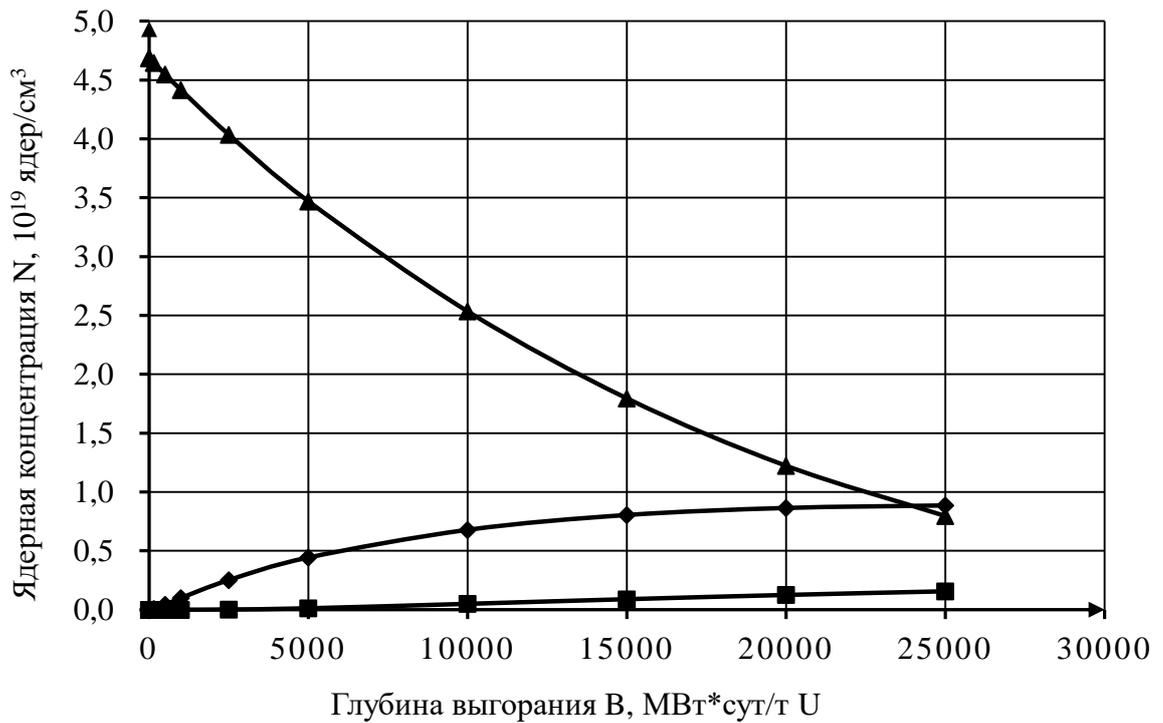


Рисунок 24 – График зависимости концентраций U^{235} , Pu^{239} и Pu^{241} от глубины выгорания: \blacktriangle U^{235} , \blacklozenge Pu^{239} , \blacksquare Pu^{241} .

На рисунке 25 представлен график зависимости реактивностей от глубины выгорания для «холодного» и «горячего» реактора.

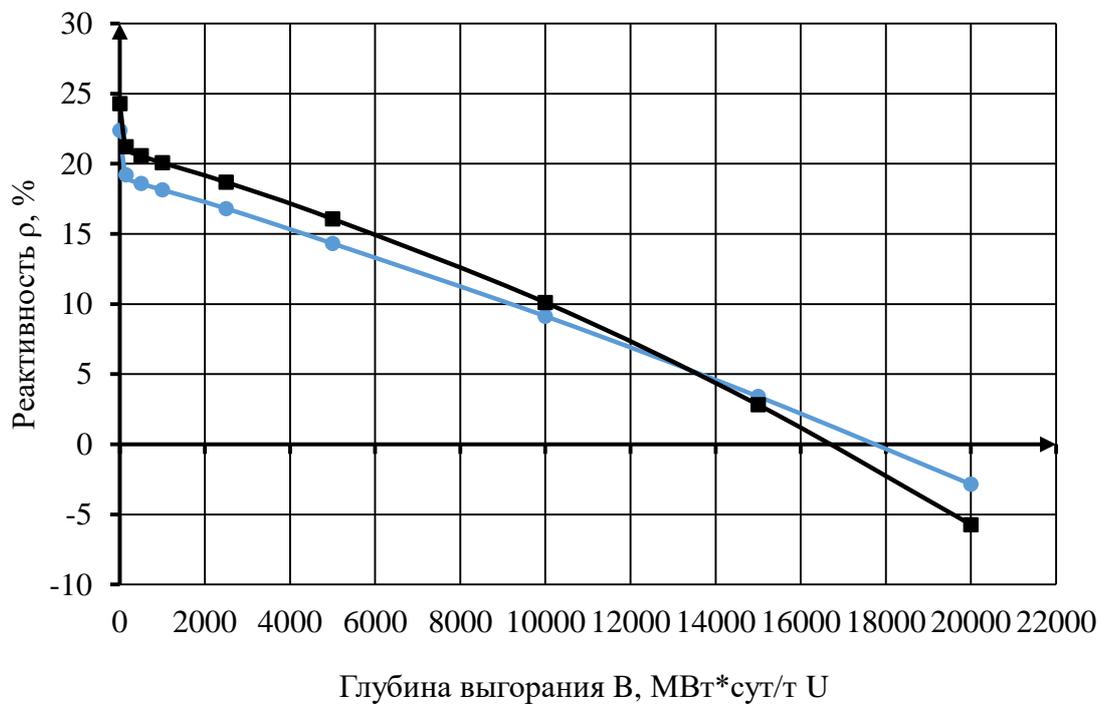


Рисунок 25 – График зависимости реактивностей от глубины выгорания: \blacksquare «холодный» реактор, \blacklozenge «горячий» реактор.

При уменьшении концентрации пароводяной смеси до $\gamma = 0,1$ г/см³ наблюдается уменьшение выгорания U^{235} , и накопления Pu^{239} , Pu^{241} по сравнению с расчетом для концентрации пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³ для «холодного» реактора. При расчете для «горячего» реактора наблюдается уменьшение выгорания U^{235} и накопления Pu^{241} , но накопление для Pu^{239} увеличивается.

Запас реактивности увеличился по сравнению с расчетом для концентрации пароводяной смеси $\gamma = 1$ г/см³.

2.6 Определение температурного эффекта и коэффициента реактивности

Используя имеющуюся модель тепловыделяющего элемента определены температурные эффекты и коэффициенты реактивности при изотермическом (температура одинаковая для всех материалов) нагреве воды и топлива от 300 К до 550 К.

В таблице 19 представлены результаты расчета коэффициента реактивности, ТКР и ТЭР.

Таблица 19 – Результаты расчета коэффициента реактивности, ТКР и ТЭР

Т, К	k_{∞}	ρ , %	ТКР, %/°К	ТЭР, %
300	1,321	24,278	0	0
350	1,319	24,175	-0,00107	-0,103
400	1,317	24,078	-0,00171	-0,201
450	1,315	23,959	-0,00238	-0,320
500	1,312	23,793	-0,00330	-0,485
550	1,309	23,584	-0,00419	-0,694

На рисунке 26 представлен график зависимости ТЭР от температуры.

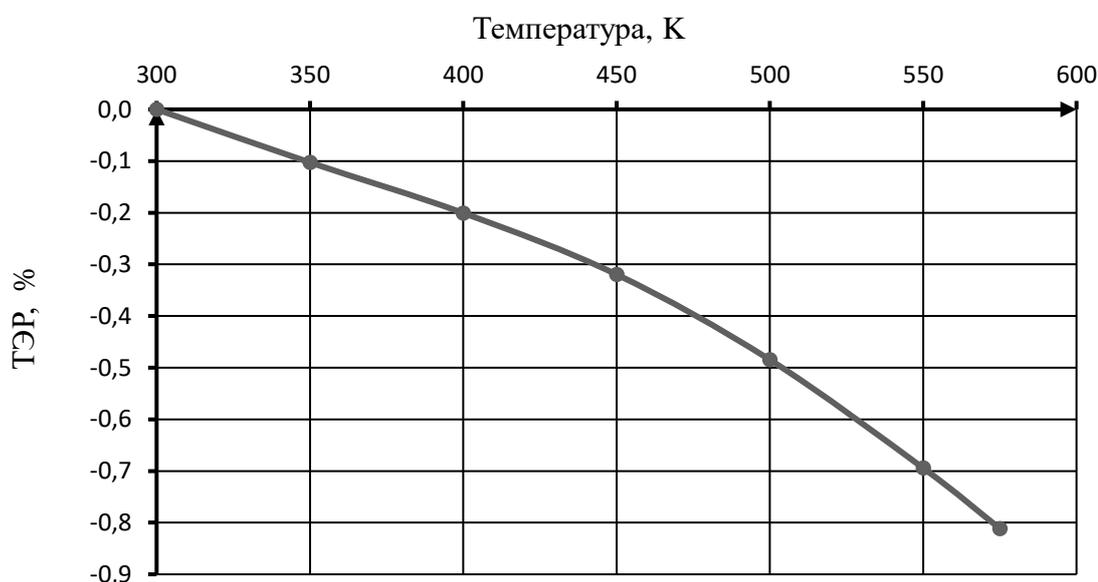


Рисунок 26 – График зависимости ТЭР от температуры

На рисунке 27 представлен график зависимости ТКР от температуры.

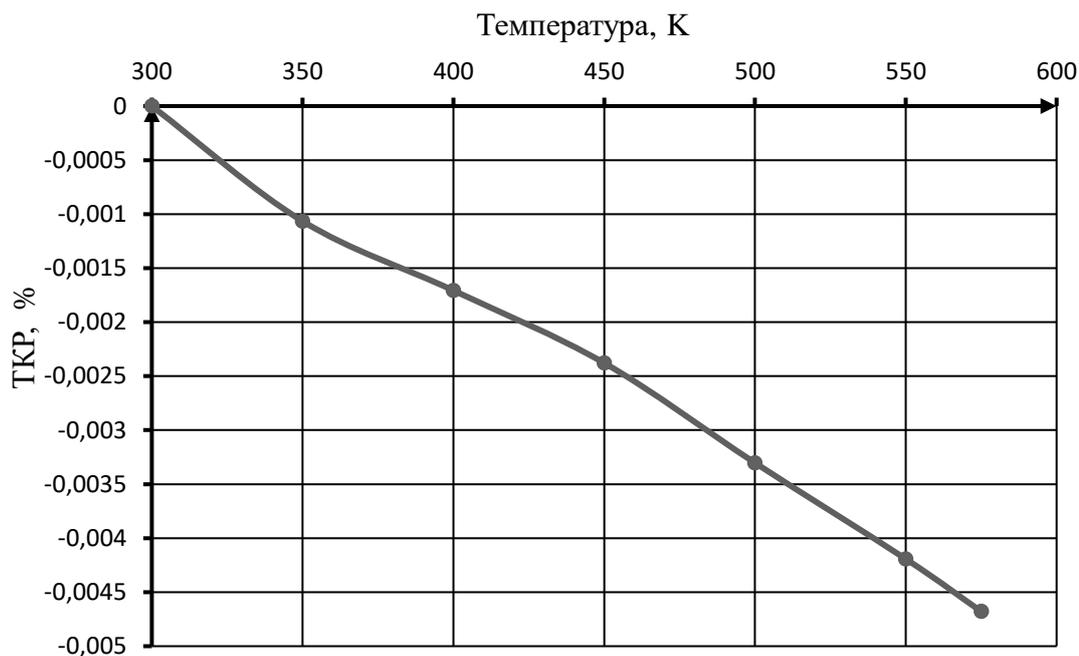


Рисунок 27 – График зависимости ТКР от температуры

Из приведенных выше зависимостей ТЭР и ТКР можно сделать вывод, что реактор является устойчивым, так как была получена кривая ТЭР третьего типа, что следует из рисунка 28.

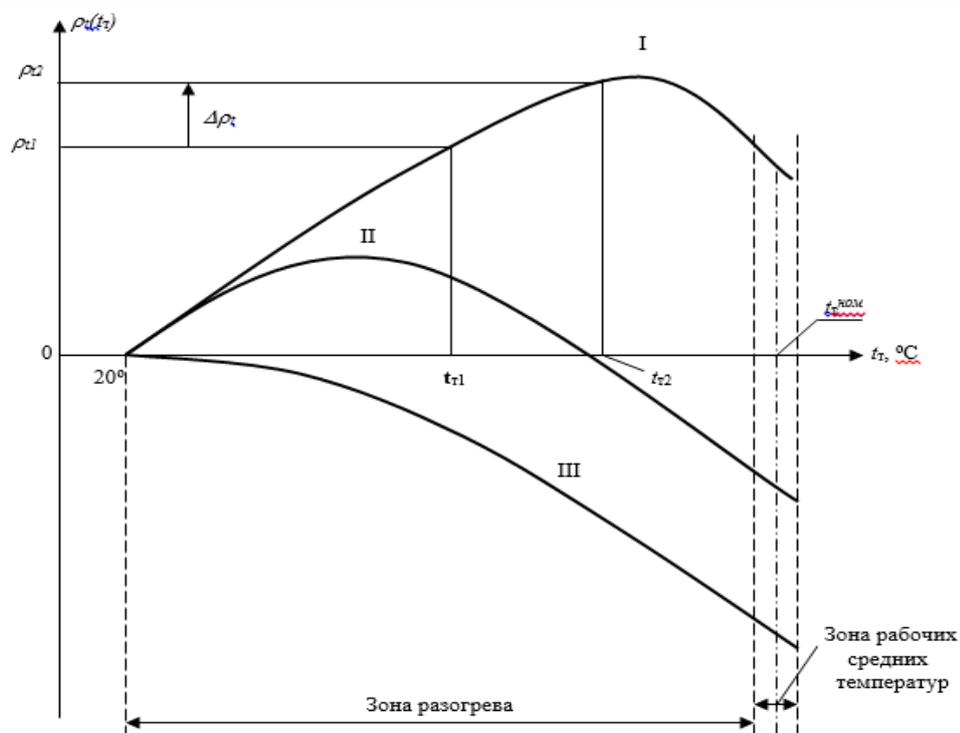


Рисунок 28 – Три типа кривых ТЭР, свойственных реальным энергетическим реакторам

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В данной диссертационной работе приведена методика по определению ресурсоэффективности водо-водяного корпусного энергетического реактора с водяным теплоносителем.

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является ядерная энергетическая установка, целью которой является производство электроэнергии.

Целевым рынком данного исследования несомненно будут являться государственные корпорации по энергетике, атомная и смежные отрасли научной промышленности, в частности по атомной энергетике. Примером могут служить такие госкорпорации как Росэнергоатом (Россия), Минэнерго (Беларусь), Энергоатом (Украина).

Сегментировать рынок услуг по разработке ядерной энергетической установки можно по следующим критериям: уровень развития атомной энергетики страны, электрическая мощность установки. Результаты сегментирования представлены в рисунке 29

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

Рисунок 29 – Карта сегментирования рынка услуг по ЯЭУ

3.1.1 Анализ конкурентных технических решений

В данной работе рассмотрен водо-водяной корпусный энергетический реактор с водяным теплоносителем. Несомненными конкурентами данной ядерно-энергетической установки являются уран-графитовый канальный реактор с водяным теплоносителем (РБМК) отечественной разработки, реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (БН) отечественной разработки, тяжеловодный водо-водяной канальный энергетический реактор с водяным теплоносителем (CANDU) канадской разработки. Не стоит забывать, что любая ядерно-энергетическая установка – это конкурент. Так как, имея общую задачу производство энергии, пути решения данной задачи могут несколько отличаться, что вызывает в каждом случае свои «плюсы» и «минусы».

Для анализа конкурентных технических решений стоит рассмотреть ядерные энергетические установки наиболее близкие по способу решения задачи производства энергии. Так же следует отметить, что в качестве сравнения следует выбрать ЯЭУ отечественных разработок, т.к. Россия является одной из лидирующих стран по уровню развития атомной энергетики

и именно отечественные разработки востребованы на российском рынке атомной энергии. Конкурентами для сравнения являются реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (БН) и каналный уран-графитовый реактор с водяным теплоносителем (РБМК).

Надежность реакторной установки (РУ) характеризует ее способность вырабатывать электрическую и (или) тепловую энергию определенных параметров в заданных режимах эксплуатации, технического обслуживания и ремонтов, сохраняя во времени в требуемых пределах значения установленных эксплуатационных показателей, одним из которых является показатель выхода радиоактивных продуктов и (или) ионизирующего излучения за предусмотренные границы.

Безопасность РУ свойство АС с помощью технических средств и специально организационных мероприятий исключать превышение установленных доз по внутреннему и внешнему облучению персонала и населения, а также превышение установленных норм содержания радиоактивных продуктов в окружающей среде.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 15. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 20 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Стоимость топлива в зависимости от обогащения	0,02	5	4	3	0,08	0,08	0,1
2. Стоимость замедлителя	0,04	4	3	3	0,11	0,11	0,07
3. Необходимость более высокого давления теплоносителя, а, следовательно, оборудования для его создания							
5. Надежность РУ	0,05	3	4	4	0,21	0,13	0,1
7. Безопасность РУ	0,3	3	4	4	1,1	0,91	0,04
9. Функциональная мощность	0,15	5	4	4	0,43	0,7	0,67
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,01	4	2	4	0,01	0,03	0,01
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	3	4	2	0,27	0,15	0,27
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	4	3	3	0,57	0,8	0,57
4. Послепродажное обслуживание	0,1	4	4	3	0,43	0,3	0,43
Итого	1	44	43	41	3,54	3,56	3,27

Выше представлен анализ конкурентоспособности ЯЭУ, представленной в данной работе, среди отечественных разработок БН-800 (Б_{к1}) и РБМК-1500 (Б_{к2}). Из анализа видно, что преимущество разрабатываемой ЯЭУ особенно заметно в функциональной мощности, что является одной из главных причин повышения производительности труда пользователя. В остальном ЯЭУ имеет такие же показатели, а где-то и хуже.

3.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [10].

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

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

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

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем [10].

В таблице 21 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 21 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	+	+	+	+
B2	+	+	+	+	+
B3	+	+	+	–	+
B4	+	+	+	+	+

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 22.

Таблица 22 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Актуальность выбранной темы.</p> <p>С2. Современная технология.</p> <p>С3. Возможность контроля процесса расчета.</p> <p>С4. Наличие актуальных данных по реакторной установке ВВЭР-1000.</p> <p>С5. Полный анализ нейтронно-физических параметров.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Наличие человеческого фактора.</p> <p>Сл2. Возможность появления погрешности расчета.</p> <p>Сл3. Продолжительное время расчетов.</p> <p>Сл4. Высокий уровень знаний для выполнения расчетов.</p> <p>Сл5. Ограниченное число рассчитываемых параметров.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование расчетов для ОКБ.</p> <p>В2. Актуальность темы для публикации в научных журналах.</p> <p>В3. Применение расчета в новых перспективных реакторных установках</p> <p>В4. Дополнительный спрос на результаты расчетов.</p> <p>В5. Снижение стоимости электроэнергии.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>1. Научная новизна, и, как следствие, публикации в цитируемых научных журналах.</p> <p>2. Увеличение мощности ЯЭУ приведет к еще более сильному снижению цен на электричество и потребует ввода дополнительных мощностей.</p> <p>3. Увеличение мощности приведет к увеличению персонала ЯЭУ.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Возникновение ошибок из-за длительных расчетов; Данный фактор при внимательной работе можно устранить.</p> <p>2. Требование наличия обширных знаний в физической теории ядерных реакторов; Данный не является большим недостатком, так как получение дополнительных знаний не принесет вреда и расширит кругозор.</p> <p>3. Высококвалифицированный персонал повысит качество работы ЯЭУ, безопасность.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Недостаточная точность аналитических</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</p>

<p>методов. У2. Низкий спрос на результаты при отсутствии публикаций. У3. Отсутствие источников для проверки полученных результатов. У4. Снижение интереса государства к развитию атомной энергетики и ввода новых мощностей. У5. Угроза диверсионных и террористических действий в отношении ЯЭУ.</p>	<p>1. Возможность увеличения мощности влечет за собой привлечение действий террористического и диверсионного характеров. 2. Постоянная работа реактора и возможность увеличения мощности вызывает дополнительный интерес у государства. 3. Использование воды обеспечивает безопасность эксплуатации реактора.</p>	<p>1. Влияние человеческого фактора может негативно сказаться на достоверность результатов, что приведет к падению шанса на публикацию. Однако при комплексной работе можно минимизировать появление ошибки. 2. Возможность аварии с течью теплоносителя и необходимость средств для её компенсации.</p>
--	--	--

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

3.2 Планирование управления научно-техническим проектом

3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Иерархическая структура работ (ИСП) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСП структурируется и определяется содержание всего проекта.

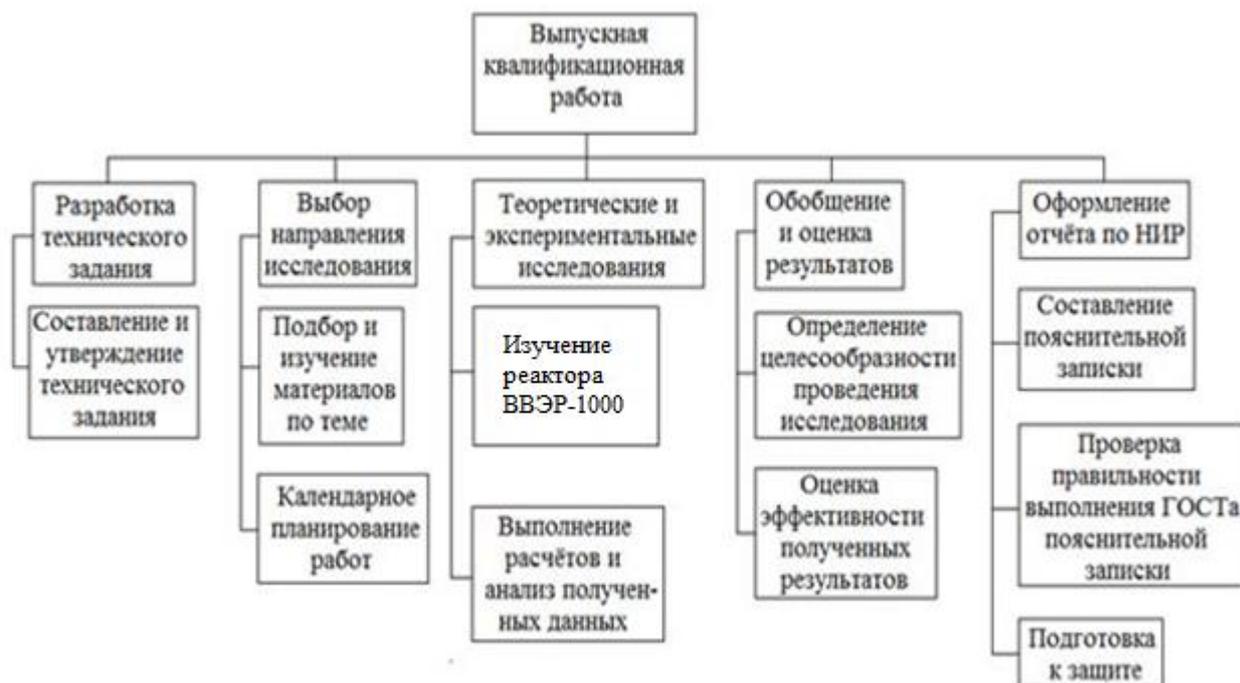


Рисунок 28 – Иерархическая структура работ

3.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 9.

Таблица 23 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2016	Приказ по ФТИ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2016	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2016	
4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2016	Отчёт
5	Календарное планирование работ	12.02.2016	План работ
6	Изучение эксплуатационных параметров ВВЭР-1000	13.02.2016	Отчёт
7	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	28.03.2016	Отчёт
8	Обобщение и оценка результатов	30.03.2016	Отчёт

Продолжение таблицы 23

9	Составление пояснительной записки	14.02.2016- 25.04.2016	Пояснительная записка
10	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2016	
11	Подготовка к защите	27.04.2016- 25.05.2016	

3.2.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ. График строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу [10].

Линейный график представлен в таблице 24.

Таблица 24 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	1	1.02.2016	3.02.2016	Руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	1	3.02.2016	5.02.2016	Руководитель
3	Выбор направления исследований	2	5.02.2016	15.02.2016	Руководитель, студент

Продолжение таблицы 24

4	Подбор и изучение материалов по теме	2	10.02.2016	12.03.2016	Студент
5	Календарное планирование работ	1	12.02.2016	14.02.2016	Руководитель, студент
6	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	45	20.02.2016	5.04.2016	Студент
7	Обобщение и оценка результатов	1	27.03.2016	30.03.2016	Руководитель, студент
8	Составление пояснительной записки	72	14.02.2016	27.04.2016	Студент
9	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	27.04.2016	30.04.2016	Руководитель, студент
10	Подготовка к защите	29	15.04.2016	15.05.2016	Студент

В таблице 25 представлен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 25 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Разработка технического задания	Руководитель	1	█														
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	█														
3	Выбор направления исследований	Руководитель, студент	2	█														
4	Подбор и изучение материалов	Студент	2		█	█												

Продолжение таблицы 25

5	Календарное планирование работ	Руководитель, студент	1																	
6	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	Студент	45																	
7	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, студент	1																	
8	Составление пояснительной записки	Студент	72																	
9	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент	1																	
10	Подготовка к защите	Студент	29																	

 – Руководитель,  – Студент

3.3 Бюджет научного исследования

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

- материальные затраты;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;

- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

3.3.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

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

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

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

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

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

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 26.

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

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Время, проведенное за ЭВМ: 600 часов. Мощность рабочей станции: 0,5 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 5,8 \cdot 0,05 \cdot 600 = 174,$$

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

P — мощность оборудования, кВт;

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

Затраты на электроэнергию составили 174 рублей.

Таблица 26 — Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Электроэнергия	кВт·ч	300	5,8	174
2. Бумага	шт.	150	0,2	30
3. Печать на листе А4	шт.	400	2	800
4. Карандаш	шт.	2	9	18
5. Ластик	шт.	1	11	11
6. Доступ в интернет	месяц	4	450	1800
7. Учебная литература	шт.	2	550	1100
8. Ноутбук hp	шт.	1	30000	30000
Итого				33933

3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

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

$Z_{доп}$ — дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб},$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

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

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

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

– при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 27).

Таблица 27 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	60	49
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	239	250

Студент во время прохождения преддипломной практики получает стипендию, равную 1750 руб/месяц. Среднедневная стипендия (оплата) составляет:

$$Z_{\text{дн}} = (2275 \cdot 10,4) / 250 = 95 \text{ руб/день.}$$

Основной заработок студента за время преддипломной практики составляет:

$$Z_{\text{осн}} = 95 \cdot 72 = 6840 \text{ руб.}$$

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

– оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор;

– стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д;

– иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью доцент. Оклад доцента составляет 26300 рублей.

Надбавки к заработной плате составляют 10000 рублей (надбавки учёного совета), также районный коэффициент по Томску равен 1,3.

Основная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = (26300 \cdot 1,3 \cdot 10) / 239 = 1431 \text{ руб/месяц.}$$

Основная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 1431 \cdot 7 = 10017 \text{ руб/день.}$$

3.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

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

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

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

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

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

Примем коэффициент дополнительной заработной платы равным 0,15 для научного руководителя и 0,1 для студента. Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 28.

Таблица 28 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Исполнитель	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{осн}}$	$Z_{\text{доп}}$
Руководитель	0,15	10017	1503
Итого			1503

3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 32 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$C_{\text{внеб}} = 0,32 \cdot (10017 + 1503) = 3687$$

3.3.5 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозяйственного инвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы в ТПУ составляют 12-16 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

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

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов, равный 12 %.

Накладные расходы составят:

$$C_{\text{накл}} = 0,15 \cdot (16857 + 1503) = 2754 \text{ руб.}$$

3.3.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 30.

Таблица 29 – Расчет бюджета затрат НТИ

Исполнитель	Сумма, руб.
Материальные затраты НТИ	33933
Основная заработная плата, руб.	16857
Дополнительная заработная плата, руб.	1503
Сумма отчислений во внебюджетные фонды	3687
Накладные расходы	2754
Бюджет затрат НТИ	58734

3.4 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и

задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель). Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 17.

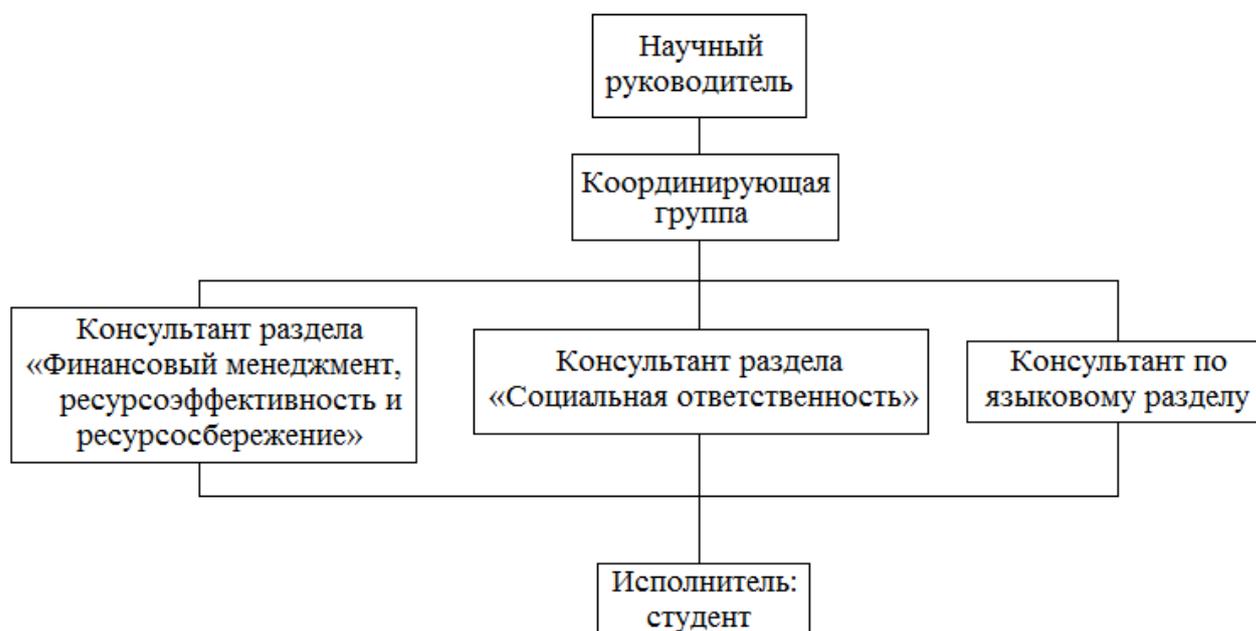


Рисунок 29 – Организационная структура научного проекта

3.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 30.

Таблица 30 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответственность»	Консультант по языковому разделу	Студент
Разработка технического задания	О				
Составление и утверждение технического задания	О				
Выбор направления исследований	О				И
Подбор и изучение материалов по теме	С				И
Календарное планирование работ	О				И
Выполнение расчётов и анализ полученных данных	О				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;
- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);

– согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

3.6 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 ресурсэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения [10].

Интегральный финансовый показатель разработки определяется:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

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

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

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

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

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{финр}^{исп.1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{max}} = \frac{58734}{58734} = 1.$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{фина1}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{61560}{58734} = 1,04; \quad I_{фина1}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{68234}{58734} = 1,16;$$

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 31).

Таблица 31 — Оценка характеристик исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	3	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	5	3	3
3. Помехоустойчивость	0,05	5	3	2
4. Энергосбережение	0,2	5	2	2
5. Надёжность	0,15	5	4	3
6. Материалоёмкость	0,15	5	4	4
ИТОГО	1	5	3,1	2,9

$$I_{\text{тп}} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 = 5;$$

$$\text{Аналог 1} = 3 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 3,1;$$

$$\text{Аналог 2} = 3 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 2,9.$$

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

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{финр}}^p}; \quad I_{\text{финаi}}^{ai} = \frac{I_m^{ai}}{I_{\text{финаi}}^{ai}};$$

В результате:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{финр}}^p} = \frac{5}{1} = 5; \quad I_{\text{фина1}}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\text{фина1}}^{a1}} = \frac{3,1}{1,05} = 2,95; \quad I_{\text{фина2}}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_{\text{фина2}}^{a2}} = \frac{2,9}{1,16} = 2,5.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.32) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финаi}}^{ai}}$$

Таблица 32 — Эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,05	1,16	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,1	2,9	5
3	Интегральный показатель эффективности	2,95	2,5	5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,69	2	1

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

Список публикаций студента

1. Бородач А.В., Гришин Н.А., Чертков Ю.Б. Влияние «водяных» твэлов на накопление PU^{239} в водо-водяном реакторе // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего: сборник материалов V Международной научно-практической конференции (7 апреля 2017 года), Том II – Кемерово: ЗапСибНЦ, 2017 – 370с.

2. Бородач А.В., Гришин Н.А. Методика контроля за состоянием корпуса реактора ВВЭР-1000 с помощью автоматизированного ультразвукового контроля установки АСК-172 «АРКУС» // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего: сборник материалов V Международной научно-практической конференции (7 апреля 2017 года), Том II – Кемерово: ЗапСибНЦ, 2017 – 370с.

3. Бородач А. В., Чертков Ю. Б. Влияние жесткости спектра нейтронов на накопление U^{233} в водо-водяном реакторе //Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VIII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 1-3 июня 2016 г.—Томск, 2016. – 2016. – С. 27-28.

4. Бородач А. В. и др. Контроль делящихся материалов //Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 3-6 июня 2015 г.—Томск, 2015. – 2015. – С. 259-260.