

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

Инженерная школа ядерных технологий
Специальность 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»
Отделение ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Нейтронно-физический расчет реактора PWR

УДК 621.039.524:621.039.534.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A8B	Гетманов Никита Дмитриевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Бычков П.Н.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Якимова Т.Б.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю.В.	К.Т.Н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2022 г.

Планируемые результаты обучения

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

ПК(У)-11.	Способностью к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования
ПК(У)-12.	Готовностью к эксплуатации современного физического оборудования, приборов и технологий
ПК(У)-13.	Способностью к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда
ПК(У)-14.	Готовностью разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, сверхвысокочастотных и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем
ПК(У)-15	Способностью к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам

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

Инженерная школа ядерных технологий
Специальность 14.03.02 «Ядерные физика и технологии»
Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A8B	Гетманов Никита Дмитриевич

Тема работы:

«Нейтронно-физический расчет реактора PWR»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	01.02.2022 №32-9/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none">– Литературный обзор для анализа конструкционных особенностей и эксплуатационных параметров активной зоны реактора PWR;– Литературный обзор программной среды Wolfram Mathematica
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none">– Анализ конструкционных особенностей и эксплуатационных параметров активной зоны реактора PWR;– Нейтронно-физический расчет реактора PWR;– Определение зависимости эффективного коэффициента размножения нейтронов от геометрических параметров элементарной ячейки– Определение оптимальных геометрических параметров элементарной ячейки.

Перечень графического материала	– Презентация – Сборочный чертеж
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Якимова Т.Б., доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Передерин Ю.В., доцент ОЯТЦ ИЯТШ

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Бычков П.Н.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8В	Гетманов Никита Дмитриевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А8В	Гетманову Никите Дмитриевичу

Школа		Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные реакторы и энергетические установки

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- районный коэффициент- 1,3; - накладные расходы – 30%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Исследование конкурентных технических решений. Проведение SWOT-анализа
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения научного исследования. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка сравнительной эффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

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

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Якимова Т.Б.	К. Э. Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8В	Гетманов Никита Дмитриевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А8В	Гетманову Никите Дмитриевичу

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, ионизирующее излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ;
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды:	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства и меры защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды:	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, меры предотвращения).

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8В	Гетманов Никита Дмитриевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 95 с., 12 рис., 15 табл., 20 источников, 4 прил., 1 сборочный чертеж.

Ключевые слова: PWR, ядерный реактор на тепловых нейтронах, нейтронно-физический расчёт, эффективный коэффициент размножения нейтронов, радиус топливной таблетки, шаг расположения ТВЭЛов в ТВС.

Объектом исследования является нейтронно-физический расчёт и изменение геометрических параметров в реакторе PWR, влияющих на эффективный коэффициент размножения нейтронов.

Цель работы – разработка программного кода для нейтронно-физического расчета реактора PWR, определение зависимости эффективного коэффициента размножения нейтронов от геометрических параметров ядерного реактора PWR.

В процессе исследования проведен расчёт нейтронно-физических свойств PWR, а также эффективного коэффициента размножения нейтронов при изменении геометрических параметров.

В результате исследования проведён нейтронно-физический расчёт, определена и построена зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от геометрических параметров.

Содержание

Введение.....	11
1 Конструкция и характеристики реактора PWR	12
1.1 Конструкция реактора ВВЭР-1000.....	12
1.2 Эффективный коэффициент размножения нейтронов.....	37
1.3 Методы расчета	41
1.4 Wolfram Mathematica	42
2 Нейтронно-физический расчет реактора PWR	44
2.1 Ввод данных	44
2.2 Предварительный расчет.....	45
2.3 Расчет ядерных концентраций нуклидов.....	48
2.4 Расчет микроскопических и макроскопических сечений	49
3 Получение зависимости $k_{эф}$ от шага расположения твэлов h и радиуса топливной таблетки $R_{мон}$	52
3.1 Зависимость $k_{эф}$ от $R_{мон}$	55
3.2 Зависимость $k_{эф}$ от h	56
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	58
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	58
4.2 Анализ конкурентных технических решений	59
4.3 SWOT-анализ.....	61
4.4 Расчёт накопления готовности проекта	64
4.5 Организация и планирование работ	66
4.6 Расчёт сметы на выполнение проекта.....	70
5 Социальная ответственность	78
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	79

5.2 Повышенный уровень электромагнитного излучения	79
5.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны	81
5.4 Превышение уровня шума	82
5.5 Отклонение показателей микроклимата	82
5.6 Психофизиологические факторы.....	83
5.7 Электробезопасность	84
5.8 Пожарная и взрывная безопасность	85
5.9 Аварийные и чрезвычайные ситуации на предприятии.....	87
5.10 Выводы по разделу.....	89
Заключение	90
Список использованных источников	91
Приложение А	94
Приложение Б.....	96
Приложение В	97

Введение

Основная задача нейтронно-физического расчета реактора состоит в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров реактора, удовлетворяющего поставленным требованиям.

Выбрав конструктивную схему реактора, с учетом требований задания, необходимо далее провести оценочный тепловой расчет, в результате которого определяются размеры активной зоны.

Одной из наиболее важных характеристик реактора является эффективный коэффициент размножения $k_{эф}$. Для оптимального функционирования реактора PWR $k_{эф}$ должен находиться в пределах 1,25-1,35. Правильно подобранные геометрические параметры элементарной топливной ячейки позволяют получить необходимые значения $k_{эф}$.

В данной работе разработана программа для нейтронно-физического расчета реактора PWR. Исходный код, написан в программной среде Wolfram Mathematica.

Целью данной работы являлся нейтронно-физический расчет реактора PWR и получение зависимости $k_{эф}$ от геометрических параметров элементарной ячейки реактора PWR.

Были поставлены задачи:

- разработать код для нейтронно-физического расчета в программной среде Wolfram Mathematica;
- провести нейтронно-физический расчет с помощью разработанного кода;
- вывести зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от геометрических параметров элементарной ячейки.

1 Конструкция и характеристики реактора PWR

1.1 Конструкция реактора ВВЭР-1000

Реактор представляет собой вертикальный герметичный сосуд цилиндрической формы с эллиптическим днищем и крышкой с установленными внутри него внутрикорпусными устройствами, в которых размещены: топливная загрузка ТВС (активная зона); органы регулирования СУЗ; пучки СВП; каналы нейтронного измерения; каналы температурного измерения; образцы-свидетели.

Реактор состоит из следующих основных узлов: корпуса; внутрикорпусных устройств (шахта, выгородка, БЗТ); активной зоны; верхнего блока; каналов внутриреакторных измерений; блока электроразводов.

На крышке реактора установлены и закреплены приводы СУЗ.

1.1.1 Корпус реактора

Корпус реактора (рисунок 1) устанавливается и фиксируется от перемещений в плане опорным буртом на опорном кольце, закрепленном в опорной ферме бетонной шахты реактора. Фланец корпуса реактора закрепляется и фиксируется от перемещений в плане с помощью упорного кольца, закрепленного в упорной ферме шахты реактора.

Корпус реактора работает в очень жестких условиях: высокие давление и температура теплоносителя, поток нейтронов с энергией более 0,5 МэВ – около $5,7 \cdot 10^{19}$ нейтр·с/см², значительные скорости теплоносителя, который даже при высокой степени чистоты является коррозионно-активной средой.

Корпус реактора предназначен для размещения в нем внутрикорпусных устройств: шахты, выгородки, блока защитных труб, топливной загрузки тепловыделяющих сборок, органов регулирования СУЗ, пучков СВП, каналов нейтронного измерения, каналов температурного контроля, сборок образцов-свидетелей корпусной стали.

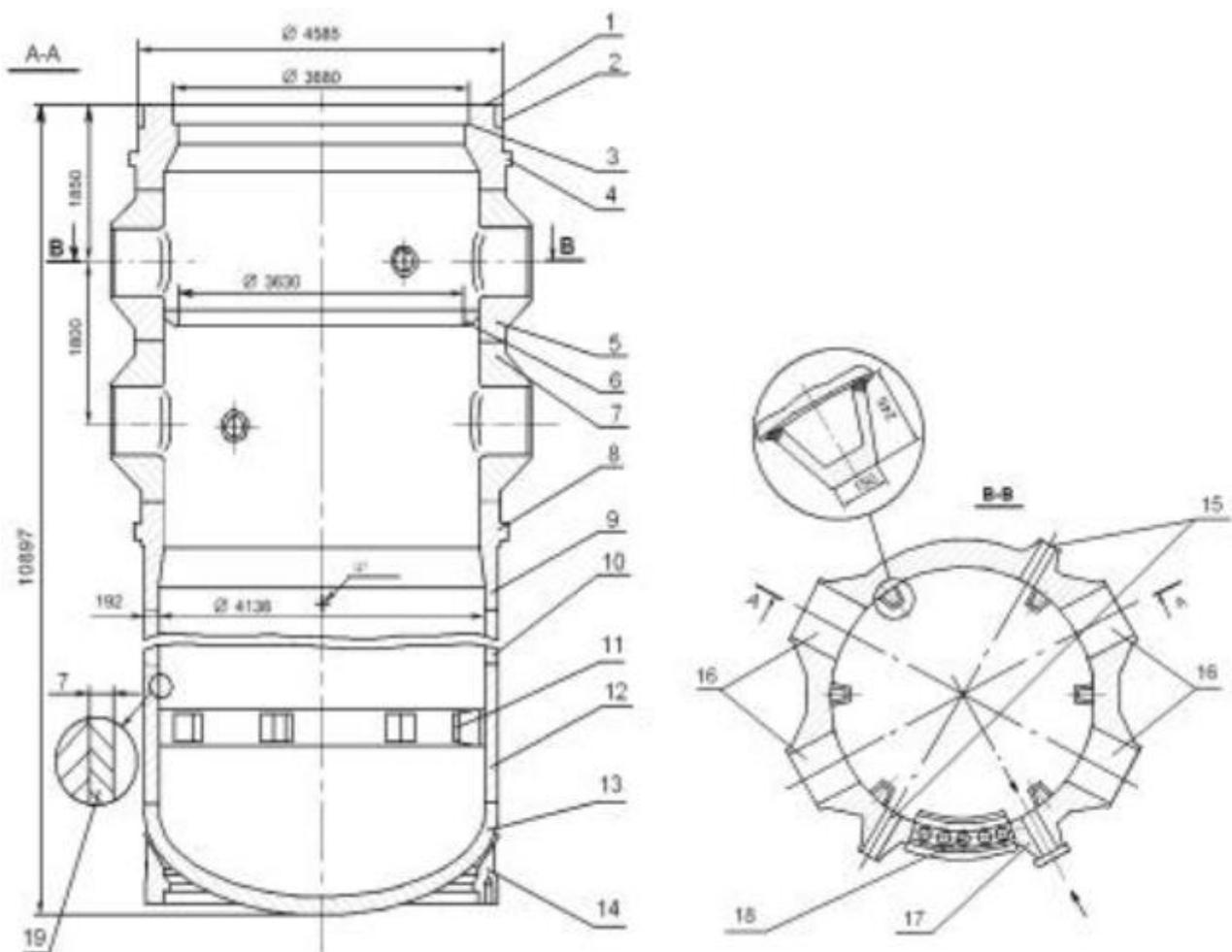


Рисунок 1 – Корпус реактора ВВЭР-1000:

1 – фланец корпуса; 2 – наплавка; 3 – бурт для установки шахты внутрикорпусной; 4 – бурт для установки кольца упорного; 5 – верхняя обечайка зоны патрубков; 6 – кольцо разделительное; 7 – нижняя обечайка зоны патрубков; 8 – опорный бурт; 9 – опорная обечайка; 10 – обечайка цилиндрической части; 11 – кронштейн-виброгаситель; 12 – обечайка цилиндрической части; 13 – эллиптическое днище; 14 – транспортная обечайка; 15 – патрубки Ду 300; 16 – патрубки Ду 850; 17 – патрубок КИП Ду 250; 18 – резьбовые гнезда; 19 – антикоррозионная наплавка

Корпус реактора представляет собой сварной цилиндрический сосуд высокого давления, который состоит из: фланца, двух обечаек зоны патрубков, опорной обечайки, нижней обечайки, эллиптического днища.

Фланец и все обечайки выполнены цельноковаными, днище – штампованное из заготовки. Патрубки Ду 850 вытянуты из основного металла обечайки зоны патрубков методом горячей штамповки и не требуют приварки промежуточных втулок при изготовлении корпуса реактора. На патрубках САОЗ и патрубке КИП, напротив, в процессе изготовления корпуса при помощи электрошлаковой сварки устанавливаются промежуточные втулки.

В качестве основного материала корпусов реакторов применена аттестованная для корпусов и трубопроводов сталь 15Х2НМФА и 15Х2НМФА-А, толщина цилиндрической части корпуса (без наплавки) – 192,5 мм.

Зона патрубков состоит из двух обечаек, в каждой из которых имеется по четыре главных циркуляционных патрубка Ду 850: в нижней обечайке для входа теплоносителя, в верхней – для выхода. На уровне осей верхнего и нижнего рядов патрубков Ду 850 расположены по два (всего четыре) отверстия с патрубками Ду 350 (351×36 мм) для организации аварийного охлаждения активной зоны реактора.

Патрубок Ду 250 служит для вывода замеров:

- 1) давления над активной зоной;
- 2) перепада давления на активной зоне;
- 3) уровня в реакторе при перегрузке топлива;
- 4) двух линий отбора проб теплоносителя.

На внутренней поверхности верхней обечайки зоны патрубков приварено разделительное кольцо. На уровне нижнего ряда патрубков Ду850 в обечайке выполнены также два патрубка Ду 300 для подсоединения трубопроводов гидроемкостей САОЗ.

Опорная обечайка выполнена с опорным буртом на наружной поверхности, с помощью которого корпус реактора опирается и закрепляется на опорном кольце, смонтированном на железобетонной консоли бетонной шахты реактора. Опорный борт является опорным элементом, воспринимающим и передающим на железобетонную консоль всю массу реактора. В опорном бурте

выполнены 22 паза под шпонки, обеспечивающие фиксацию в плане корпуса реактора.

На внутренней поверхности нижней обечайки цилиндрической части корпуса закреплены восемь кронштейнов, на которых крепятся шпонки, фиксирующие нижнюю часть шахты от перемещений в плане. Вся внутренняя поверхность корпуса покрыта антикоррозионной наплавкой из нержавеющей стали толщиной не менее 8 мм. В местах соприкосновения корпуса с крышкой, шахтой, уплотнительными прокладками, в местах приварки кронштейнов, деталей крепления трубок КИП, на поверхности разделительного кольца выполнена наплавка толщиной не менее 15мм.

На уровне верхнего ряда патрубков Ду 850 выполнен один патрубок для вывода импульсных линий из корпуса реактора. Каждая импульсная линия на выходе из патрубка имеет отключающее устройство. Из корпуса реактора В-320 выведено девять импульсных линий:

- 1) 2 трубки – для подсоединения к уровнемеру и отбору проб;
- 2) 6 трубок – для Р а.з.;
- 3) 1 – для отбора проб.

В патрубках САОЗ установлены тепловые рубашки.

В теле фланца корпуса выполнены 54 резьбовых гнезда М170Х6 под шпильки главного уплотнения. На горизонтальной уплотнительной поверхности фланца выполнены две V-образные кольцевые канавки для размещения прутковых никелевых уплотнительных прокладок диаметром 5 мм. Плотность главного разъема обеспечивается путем обжатия этих прокладок, которые устанавливаются в место контакта фланцев крышки и корпуса в V-образные кольцевые канавки на фланце корпуса. Затяжка шпилек производится с помощью гайковерта, работающего по принципу вытяжки шпилек со свободным наворачиванием гаек.

Для контроля плотности главного разъема реактора во фланце корпуса выполнено специальное сверление, соединяющее межпрокладочное пространство с резьбовым отверстием, в которое устанавливается штуцер,

соединяющий систему контроля протечек (рисунок 2) с межпрокладочным пространством главного разъема реактора (ГРР).



Рисунок 2 – Организация контроля протечек главного разъема

Во время перегрузок топлива (при извлеченных шпильках) для исключения попадания борного раствора в гнезда шпилек в них устанавливаются специальные заглушки, которые предусматриваются в объеме поставки реактора. Для защиты шпилек главного разъема от воздействия борной кислоты (при заполнении борным раствором бетонной шахты во время перегрузок топлива) предусматриваются защитные чехлы для шпилек.

На внутренней поверхности верхней обечайки зоны патрубков ниже уровня патрубков Ду 850 приварено кольцо-разделитель потока теплоносителя. Внутренний диаметр кольца выбран из условия нулевого натяга между ним и шахтой реактора при рабочей температуре для сведения к минимуму перетекания теплоносителя из «холодных» в «горячие» петли минуя активную зону реактора (согласно сборочным чертежам РУ в холодном состоянии этот зазор равен 6 мм). Разделительное кольцо изготовлено из стали 22К-Ш и плакировано нержавеющей сталью. На внутренней поверхности корпуса в нижней части приварены восемь скоб-кронштейнов, к которым на монтаже привариваются шпонки, сопрягаемые с пазами в шахте и обеспечивающие ее закрепление от вибрации.

Вся внутренняя поверхность корпуса покрыта антикоррозийной наплавкой толщиной 7–9 мм. В районах соприкосновения с крышкой, шахтой,

прокладкой, в местах приварки кронштейнов, деталей крепления трубок КИП, на внутренней поверхности всех патрубков антикоррозийная наплавка имеет толщину не менее 15 мм.

Корпус реактора по высоте имеет шесть кольцевых сварных швов между обечайками и днищем. Днище корпуса изготовлено методом штамповки из двух листовых заготовок, имеющих электрошлаковый шов. На наружной поверхности днища корпуса в четырех местах по кольцевому поясу выполнена наружная наплавка для приварки кольцевой конструкции на период транспортировки корпуса реактора по железной дороге. Одинаковый наружный диаметр корпуса реактора 4535 мм по высоте активной зоны позволяет проводить дистанционно ультразвуковой контроль сварных швов и материала корпуса в районе активной зоны и днища. Для корпусов реакторов ВВЭР-1000 предусмотрена система наружного осмотра и неразрушающего ультразвукового контроля (УЗК) корпуса. Система состоит из двух подсистем: подсистемы УЗК и телевизионного осмотра цилиндрической части днища корпуса реактора, подсистемы УЗК сварных швов зоны патрубков.

В районе патрубков на корпусе реактора В-320 снаружи наплавлены специальные фигурные площадки (16 мест), предназначенные для крепления направляющих, по которым перемещается устройство УЗК кольцевых швов.

С наружной стороны двух обечаек (в районе активной зоны) в шести местах выполнены наплавки размером 60×50×10 мм. Эти наплавки служат для установки термометров сопротивления, предназначенных для оперативного контроля температуры корпуса реактора. Контроль температуры металла корпуса предусмотрен также в районе зоны патрубков. На торцах всех патрубков корпуса произведены наплавка и обработка присоединительных размеров в зависимости от метода сварки со стыкуемыми трубопроводами. Максимальный наружный диаметр корпуса реактора 4690 мм (диаметр опорного бурта) выбран из расчета транспортировки корпуса реактора. При этом транспортировка корпуса реактора на железнодорожном транспортере возможна, когда оси двух пар патрубков Ду 850 расположены под углом 55°.

1.1.2 Шахта внутрикорпусная

Шахта, устанавливаемая и закрепляемая в реакторе, в проточке, на внутренней поверхности фланца корпуса реактора (рисунок 3), центрируется и фиксируется от перемещений в плане:

1) в верхней части посредством упругих элементов из труб 63×5, размещенных между крышкой реактора и фланцем шахты, и шпонок, закрепленных на фланце корпуса. При затяжке главного уплотнения реактора эти трубы упруго деформируются, создавая распорное усилие между крышкой и шахтой;

2) в средней части разделительным кольцом, приваренным к внутренней поверхности корпуса реактора, между входными и выходными патрубками;

3) в нижней части шпонками, приваренными к кронштейнам, закрепленным на внутренней поверхности нижней обечайки корпуса реактора.

Нижняя часть шахты, образованная перфорированным эллиптическим днищем, совместно с укрепленными на нем опорными трубами и дистанционирующей решеткой, является опорной конструкцией для топливной загрузки ТВС.

Шахта реактора размещается в корпусе реактора и предназначена для: размещения и закрепления в ней выгородки, размещения в ней топливной загрузки ТВС, органов СУЗ, пучков СВП, организации проектного направленного движения потоков теплоносителя в реакторе, организации равномерного и проектного расхода теплоносителя на входе в ТВС, ослабления интенсивности нейтронного потока, излучаемого активной зоной на корпус реактора.

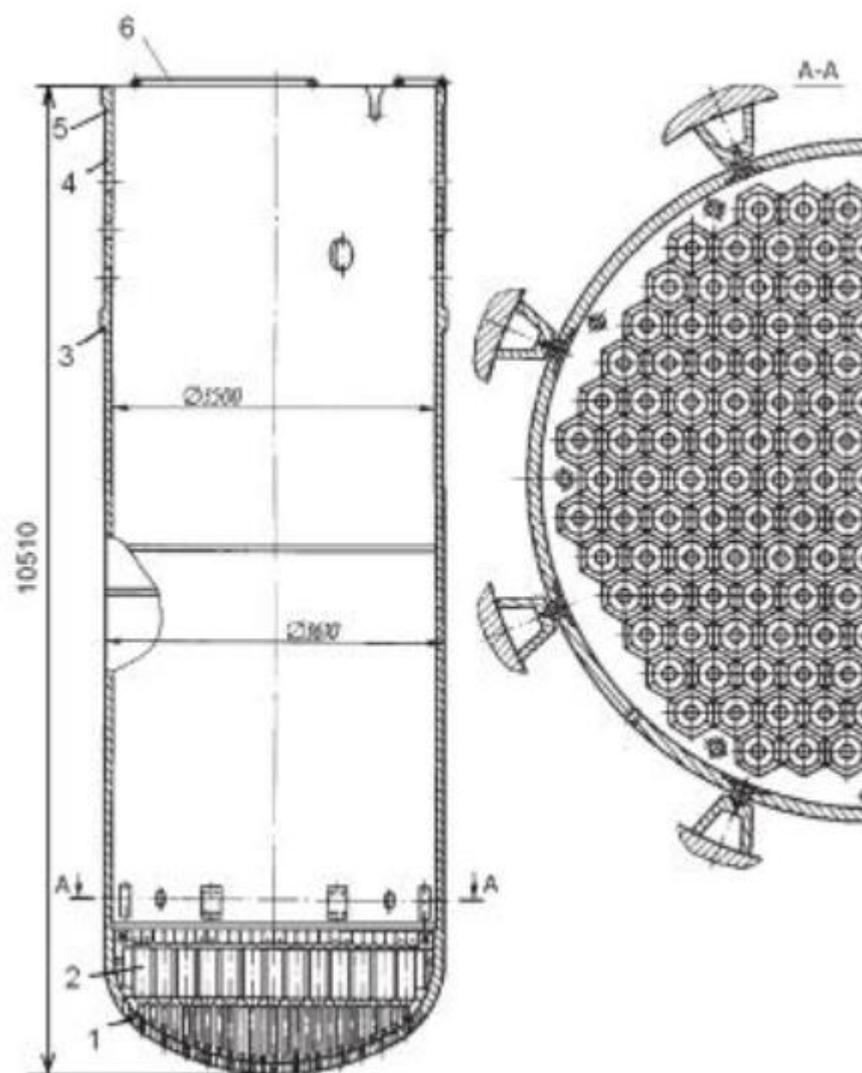


Рисунок 3 – Шахта внутрикорпусная:

- 1 – перфорированное днище; 2 – опорные трубы для установки ТВС;
- 3 – кольцевое утолщение; 4 – цилиндрическая обечайка; 5 – фланец;
- 6 – трубчатый сектор

Шахта реактора представляет собой вертикальный полый цилиндр с днищем, сваренный из составных частей: верхней перфорированной обечайки с фланцем, обечаек средней цилиндрической части шахты, перфорированного эллиптического днища, дистанционирующей решетки, 163 опор ТВС.

Шахта и выгородка являются составной частью защиты металла корпуса реактора от воздействия нейтронного и гамма-излучений, исходящих из активной зоны реактора. Одновременно шахта и выгородка входят в состав

железобетонного отражателя, где основным отражателем – теплоносителем первого контура. Конструкция шахты и принцип ее закрепления в корпусе позволяют производить ее извлечение из корпуса для возможности осмотра внутренней поверхности и патрубков корпуса.

Шахта представляет собой цилиндрическую обечайку с фланцем и эллиптическим днищем, в котором закреплены 163 опорные трубы (стаканы) с шагом 236 мм, верхние части которых образуют опорную плиту для установки и дистанционирования кассет активной зоны. Материал шахты – сталь 08Х18Н10Т, масса – 80,5 т. Снаружи на фланце шахты имеются двенадцать пазов шириной 100 мм для ориентации ее по углу в плане. Шпонки, входящие в эти пазы, привариваются к внутренней поверхности фланца корпуса реактора.

Кривизна эллиптического днища шахты больше кривизны днища корпуса реактора, в днище шахты выполнены выступающие (примерно на 30 мм) упоры. Это обеспечивает во всех проектных авариях (включая МПА) между днищем шахты и днищем корпуса гарантированный зазор для прохода теплоносителя в активную зону. Снизу днище снабжено упорами. В случае обрыва шахты это исключает прекращение подачи теплоносителя на входы ТВС.

Для разделения потоков “горячего” и “холодного” теплоносителя на наружной поверхности шахты выполнено кольцевое утолщение, контактирующее с внутренней поверхностью разделительного кольца корпуса реактора. Величина зазора между утолщением шахты и внутренней поверхностью разделительного кольца выбирается из условия минимальных напряжений и протечек при разогреве узлов реактора (разделительное кольцо с шахтой при рабочих параметрах имеет нулевой натяг).

Опора ТВС (рисунок 4) предназначена для размещения в ней хвостовой части ТВС и восприятия всей нагрузки ТВС. Равномерное размещение опор в дистанционирующей решетке обеспечивает равномерное распределение нагрузки от ТВС на эллиптическое днище шахты. Конструкция опоры обеспечивает также: фиксацию ТВС в плане; равномерную подачу теплоносителя на входе в ТВС; защиту от попадания посторонних предметов на

вход ТВС. Опора состоит из головки, перфорированного стакана диаметром 195 и хвостовика. Перфорация стакана выполнена в виде узких щелей шириной 3 мм. В верхнем торце головки опоры выполнены 6 пазов для фиксации ТВС в плане. Опоры установлены на эллиптическом днище с шагом 236 мм. Головки опор закрепляются с помощью сварных швов в дистанционирующей решетке. Хвостовики опор закреплены в эллиптическом днище шахты. В головке опоры ТВС выполнена конусная проточка под посадку шаровой поверхности хвостовика ТВС. Опоры ТВС изготовлены из нержавеющей стали марки 08X18H10T.

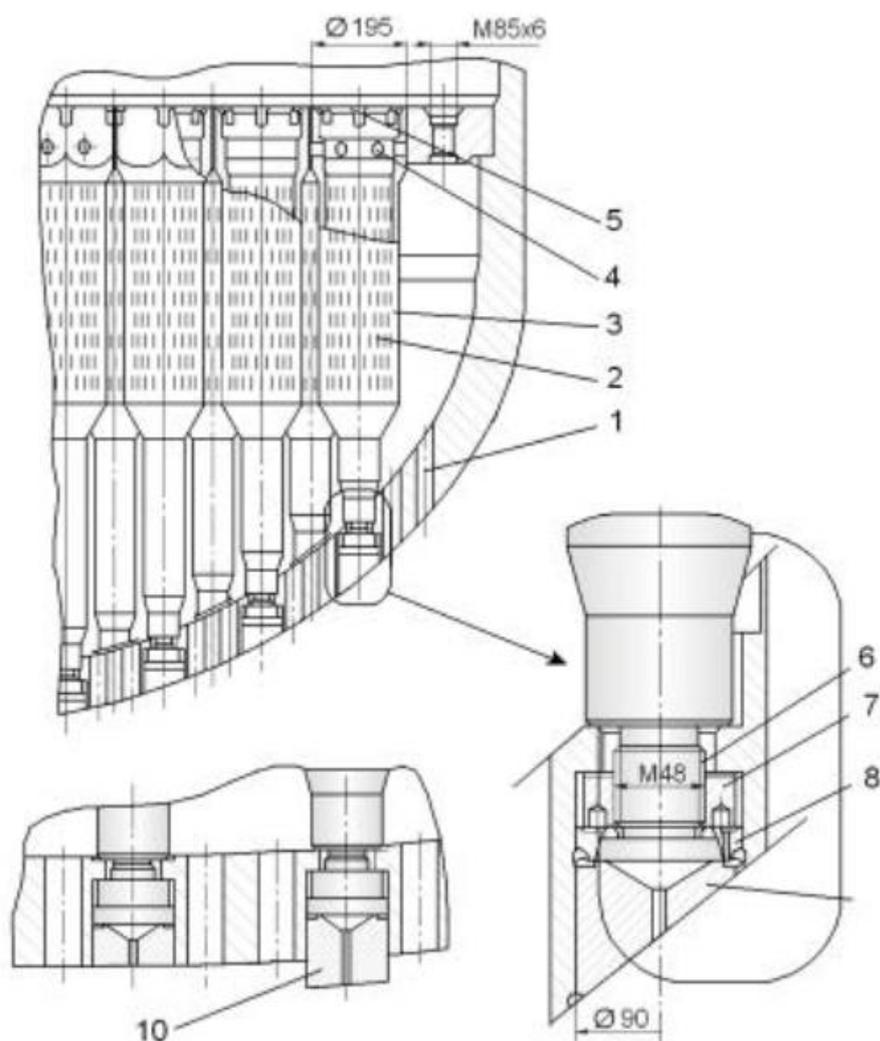


Рисунок 4 – Низ внутрикорпусной шахты:

1 – отверстие; 2 – щель (3 мм); 3 – опорная труба; 4 – винт; 5 – паз;
6 – хвостовик опорной трубы; 7 – гайка; 8 – шайба; 9 – заглушка; 10 – упор

Дистанционирующая решетка предназначена: для размещения, дистанционирования и закрепления головок опор ТВС; размещения и закрепления на ней выгородки. Дистанционирующая решетка представляет собой круглую плиту толщиной 100 мм, перфорированную 163 отверстиями диаметром 225 для размещения и закрепления головок опор ТВС.

Дистанционирующая решетка закрепляется в нижней части шахты с помощью 12-ти штифтов диаметром 60 мм с последующей их обваркой с наружной стороны шахты. Решетка изготовлена из нержавеющей стали марки 08X18H10T. В решетке шахты реактора В-320 имеются следующие вертикальные отверстия: шесть отверстий с резьбой М85х6, три отверстия с переходным диаметром 86×50 мм, 27 отверстий с переходным диаметром 11,5×30 мм, 54 отверстия с переходным диаметром 8×30 мм.

Отверстия предназначены для ориентации при установке выгородки, ее закрепления, организации охлаждения элементов выгородки, размещения образцов-свидетелей корпусной стали («лучевых» сборок) и обеспечения железородного соотношения по высоте выгородки.

Нижняя часть шахты состоит из перфорированного эллиптического днища и закрепленных в нем упорных стаканов, верхние части которых образуют упорную плиту для установки и дистанционирования кассет активной зоны. Упорные стаканы установлены с шагом 236 мм и выполнены в виде перфорированных труб, верхняя часть которых представляет собой шестигранные призмы с центральными отверстиями диаметром 195, в которые устанавливаются хвостовики кассет. На торце каждого стакана имеются пазы для ориентации кассеты с помощью фиксирующего штыря в плане. Перфорация труб выполнена в виде узких щелей (ширина щели 3, а длина 30 мм), что способствует задержанию из потока теплоносителя твердых частиц и защите ТВЭЛов от механических повреждений.

Хвостовики стаканов закреплены неподвижно в эллиптическом днище шахты, а шестигранные призмы – друг относительно друга с помощью отжимных винтов М36 и сварки. Основной поток теплоносителя в шахту

поступает в имеющиеся отверстия в днище и распределяется по ТВС через перфорированную часть опорных труб. Профиль опускной щели между днищем шахты и внутренней поверхностью корпуса, а также степень перфорации шахты выбраны таким образом, чтобы пульсации и неравномерности скоростей потока теплоносителя перед входом в активную зону были минимальными.

В эллиптическом днище и верхней части шахты выполнена перфорация для прохода теплоносителя. Против верхних патрубков САОЗ корпуса в шахте выполнены два отверстия Ду 300, через которые вода, подаваемая в реактор при аварии, проходит в межтрубное пространство БЗТ.

Своим верхним фланцем шахта устанавливается на внутреннюю проточку в горловине корпуса и центрируется кольцом – разделителем потока, сверху удерживается от перемещений в плане шпонками, приваренными к фланцу корпуса. Нижняя часть шахты удерживается от вибрации шпонками, приваренными к виброгасителям корпуса и входящими в вертикальные пазы шахты.

На горизонтальной поверхности фланца шахты размещены три торовых сектора, изготовленные из нержавеющей труб 63×5 мм, наружная и внутренняя поверхности которых электрохимполированы или светлотравлены, и закрепленные тремя шпильками М 20 каждый. Закрепление шахты в верхней части обеспечено посредством упругих элементов из труб 63×5, и шпонок, закрепленных на фланце корпуса. При затяжке главного уплотнения реактора эти трубы упруго деформируются, создавая распорное усилие между крышкой и шахтой. Во фланце выполнено 24 гнезда с резьбой М48, предназначенных для закрепления устройства для ее подрыва и транспортировки в вертикальном положении.

Снаружи на фланце шахты имеются 12 пазов шириной 100 мм для ориентации ее по углу в плане. Шпонки, входящие в эти пазы, привариваются к внутренней поверхности фланца корпуса. На внутренней поверхности фланца шахты имеются три направляющих паза длиной 410 мм для ориентации установки блока защитных труб и устройства для транспортировки шахты. В

верхней части шахты выполнены отверстия для прохода теплоносителя в выходные патрубки Ду 850 корпуса реактора. Напротив верхних тепловых рубашек патрубков САОЗ в шахте – два отверстия диаметром 300 мм, через которые борный раствор подается на активную зону реактора при срабатывании запорной арматуры на трубопроводах САОЗ.

На наружной части обечайки с днищем выполнены восемь продольных пазов шириной 100 мм, оканчивающихся сквозными окнами. Окна предназначены для установки шпонок по месту на скобы-кронштейны, приваренные при изготовлении корпуса к внутренней наплавке корпуса реактора. Такая конструкция шахты обеспечивает тепловое перемещение ее вниз и закрепление от вибрации. Закрепление шахты в средней части обеспечено посредством прижатия (защемления) ее по периметру к разделительному кольцу корпуса при разогреве шахты. Нижняя часть шахты фиксируется в плане шпонками, закрепленными на кронштейнах, приваренных к цилиндрической части корпуса.

От перемещений вверх (всплытие и вибрация) при работе насосов шахту удерживают упругие элементы из труб 63×5. От вибрации в поперечном направлении шахта удерживается в трех сечениях. От падения вниз шахта удерживается фланцем и упорами на днище. Закрепление верхней части шахты в корпусе допускает температурные осевые и радиальные перемещения ее относительно корпуса.

1.1.3 Выгородка

В шахте размещена выгородка (рисунок 5), внутренняя поверхность которой повторяет конфигурацию периферийного ряда ТВС и обеспечивает сохранение геометрических размеров активной зоны. В специальных гнездах, в верхней части вертикальных каналов выгородки, установлены контейнеры со сборками образцов свидетелей корпусной стали.

Полная загрузка топлива в реактор состоит из 163 ТВС, из которых 61 имеет органы СУЗ, а 54 ТВС – пучки СВП. Для компенсации температурных расширений ВКУ и ТВС головки ТВС выполнены подпружиненными.

Назначение выгородки: обеспечение геометрической конфигурации периферии активной зоны, образованной ТВС периферических рядов, уменьшение всплеска нейтронного потока на границе активной зоны у граничных ТВЭЛов ТВС периферийных рядов, уменьшение интенсивности нейтронного потока на корпус реактора, обеспечение циркуляции теплоносителя по проектному тракту, размещение сборок «лучевых» образцов-свидетелей корпусной стали.

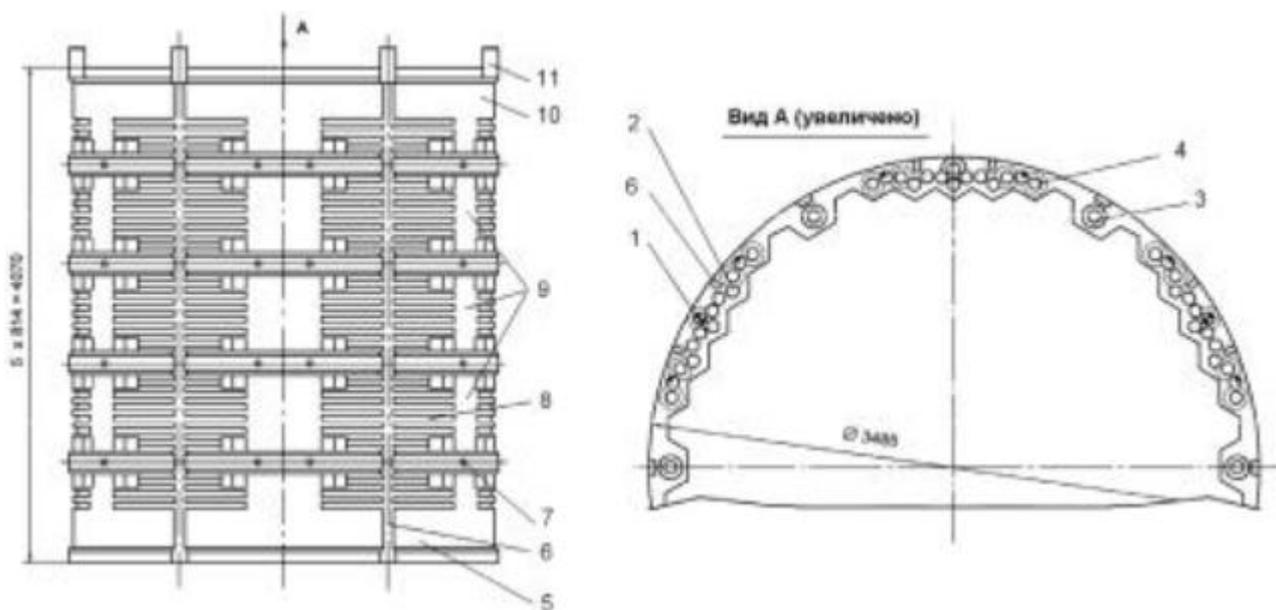


Рисунок 5 – Выгородка:

1 – штырь; 2 – канал для охлаждения выгородки; 3 – канал резьбовой тяги; 4 – канал с лучевым образцом-свидетелем; 5 – кольцо нижнее; 6 – вертикальный паз-канал; 7 – штифт; 8 – кольцевая проточка; 9 – кольцо среднее; 10 – кольцо верхнее; 11 – шпонка

Выгородка редактора В-320, показанная на рисунке, представляет собой обечайку диаметром 3485 мм, высотой 4070 мм, состоящую из четырех кованых колец, скрепленных между собой с помощью шпилек и фиксируемых в плане

друг относительно друга штифтами. Материал выгородки – сталь 08X18H10T, масса – 35 т. Количество металла в выгородке принято максимальным для эффективного снижения потока нейтронов, падающих на корпус реактора. Внутренняя конфигурация колец повторяет профиль, образованный гранями кассет активной зоны. Для охлаждения на кольцах имеются продольные каналы. При установке выгородки на граненый пояс шахты, каналы в выгородке совпадают с отверстиями в граненом поясе шахты.

В шести сквозных отверстиях выгородки установлены трубы с резьбой в нижней части, предназначенные для жесткого закрепления выгородки в шахте (путем вворачивания их в граненый пояс шахты) от всплытия и одновременно используемые под установку датчиков системы контроля перегрузки (СКП). Кроме того, выгородка предварительно устанавливается на три фиксатора, закрепленные в граненом поясе шахты. Верхнее кольцо выгородки центрируется относительно цилиндрической части шахты шпонками, привариваемыми к внутренней поверхности шахты и входящими в вертикальные пазы выгородки. Ниже шпонок, по направлению продольных пазов выгородки, к внутренней поверхности шахты приварены вытеснители, в которые по высоте и ширине имеют меньшие размеры, чем шпонки.

На наружной поверхности в районе вертикальных пазов выгородки на кольцах выполнены горизонтальные пазы для обеспечения равномерного охлаждения выгородки в этом районе. В верхней части выгородки установлены трубы с пазами для байонетного захвата контейнерных сборок с образцами-свидетелями корпусной стали. В выгородке, кроме отверстий для крепления колец, имеется 72 вертикальных канала для охлаждения выгородки. Одновременно эти каналы используются для следующих целей: шесть каналов диаметром 130 мм предназначены для труб, крепящих выгородку к шахте, в эти трубы во время работ по перегрузки топлива устанавливаются сухие каналы системы контроля перегрузки, шесть каналов, оканчивающихся отверстиями с резьбой М85 – для транспортировки выгородки, в 30-ти каналах (на верхнем кольце выгородки) в монтажных условиях приваривают трубы, выступающие

над горизонтальной плоскостью кольца на 35 мм, в которые устанавливаются сборки с лучевыми образцами-свидетелями, 30 каналов – для охлаждения.

Все продольные каналы выгородки имеют шайбы (конструктивно в граненом поясе шахты), которые обеспечивают необходимый расход теплоносителя через них. Выем выгородки из реактора производится совместно с шахтой. Таким образом, выгородка неподвижно крепится в нижней части в шахте, а верхняя часть выгородки осуществляет температурное перемещение относительно стенки шахты реактора.

1.1.4 Блок защитных труб

Сверху на подпружиненные головки ТВС устанавливается блок защитных труб (рисунок 6). БЗТ прижимает ТВС и фиксирует их в плане. Прижимное усилие, создаваемое БЗТ, компенсирует подъемную силу потока теплоносителя, воздействующего на ТВС, и предотвращает их всплытие. В пеналах, закрепленных к верхней обечайке БЗТ, установлены контейнеры со сборками «тепловых» образцов-свидетелей корпусной стали.

В 61 защитной трубе БЗТ перемещаются органы СУЗ. БЗТ фиксируется от перемещений в плане в шахте реактора:

- в верхней части – посредством трех шпонок, закрепленных на внешней поверхности верхней обечайки БЗТ, входящих в пазы в верхней части шахты;
- в нижней – посредством шести шпонок, закрепленных на внутренней поверхности шахты, входящих в пазы в нижней опорной плите БЗТ.

- размещение труб для защиты органов СУЗ от динамического воздействия потоков теплоносителя (защитные трубы, кроме того, обеспечивают проектную скорость падения ОР и предотвращают их заклинивание);
- размещение защитных труб чехлов каналов нейтронного измерения, обеспечивающих их закрепление и фиксацию;
- размещение и закрепление контейнеров со сборками «тепловых» образцов-свидетелей;
- создание перемешивания и равномерного расхода теплоносителя на выходе из активной зоны и на входе в верхнюю камеру реактора.

БЗТ представляет собой сварную металлоконструкцию, состоящую из: нижней опорной плиты, средней плиты, верхней плиты, верхней обечайки, перфорированной обечайки, 61 защитной трубы органов СУЗ, 60 защитных труб для чехлов каналов ТК и КНИ, 64 чехловых труб для каналов КНИ, 98 чехловых труб для каналов ТК.

БЗТ представляет собой сварную металлоконструкцию, состоящую из верхней, средней и нижней плит, связанных между собой перфорированным корпусом и защитными трубами СУЗ, каналов ВРК (ТК и КНИ). Материал БЗТ-сталь 08Х18Н10Т, масса – 60 т. В 61 защитную трубу установлены направляющие каркасы, в которых с помощью приводов типа ШЭМ перемещаются траверсы с регулирующими стержнями. В каждом каркасе защитной трубы предусмотрен плотный канал для установки термометра термоэлектрического. Всего в БЗТ размещено 98 плотных чехлов, в том числе три – для замера температуры теплоносителя под крышкой реактора.

Нижняя опорная плита БЗТ толщиной 250 и диаметром 3490 мм, в ней выполнены: сквозные отверстия круглой и эллиптической формы, обеспечивающие проход потока теплоносителя из активной зоны сквозь плиту; 61 сквозное отверстие диаметром 176, для размещения и закрепления в плите нижних частей защитных труб органов СУЗ и проход органов СУЗ в активную зону; 60 сквозных отверстий диаметром 110, для размещения и закрепления в

плите нижних частей защитных труб чехлов каналов КНИ и ТК; 30 сквозных отверстий диаметром 30 по периферии плиты, обеспечивающие проход чехлов каналов КНИ и ТК к головкам ТВС периферийных рядов ТВС в активной зоне.

На наружной торцевой поверхности плиты выполнены 6 пазов, размещенных по окружности друг относительно друга через 60 °С. При установке БЗТ эти пазы садятся на 6 шпонок в шахте реактора, фиксируя БЗТ в плане. В нижней опорной плите БЗТ со стороны нижней поверхности на глубину 70 мм выполнены 163 углубления, в виде усеченных конусов с шестью пазами. В эти конусные углубления входят головки ТВС и фиксируются в них в плане и по высоте.

Средняя плита БЗТ представляет собой плиту толщиной 200 и диаметром 3400 мм, в ней выполнены:

- средняя плита БЗТ, устанавливаемая и закрепляемая на нижней перфорированной обечайке и имеющая одинаковое число отверстий с нижней плитой;
- средняя и нижняя опорная плиты, также жестко связанные между собой путем закрепления в них концов защитных труб.

Верхняя плита БЗТ толщиной 70 и диаметром 3300 мм, в ней выполнены: 36 сквозных отверстий диаметром 200 мм, обеспечивающие циркуляцию теплоносителя под крышку ВБ; 61 сквозное отверстие диаметром 165 мм (для закрепления направляющих труб штанг органов СУЗ); 14 сквозных отверстий диаметром 100 мм (для прохода пучков чехловых труб каналов ТК); 16 сквозных отверстий диаметром 165 мм (для прохода пучков чехловых труб каналов КНИ).

Верхняя плита БЗТ устанавливается и закрепляется на верхней обечайке. Над верхней плитой БЗТ плотные чехлы термометров объединены в 14 стояков ТК, которые расположены на периферийной части БЗТ и проходят через периферийные трубки в крышке верхнего блока. Плотных каналов ТК в стояке – 7. Радиусы гибов каналов составляют не менее 600 мм. Чтобы исключить попадание борного раствора в плотные каналы ТК при извлечении и

установке БЗТ в реактор, до заполнения шахты реактора борным раствором на стояки ТК устанавливаются заглушки, при помощи которых уплотняются верхние части стояков ТК и производится проверка плотности стояков ТК давлением азота 1,7 кгс/см² с обмыливанием мест уплотнения. В верхней плите предусмотрены отверстия для транспортировки БЗТ.

Между средней и нижней плитами БЗТ, кроме защитных труб с направляющими каркасами, труб с чехлами для термометров, установлено 60 защитных труб, в которых по центру проходит направляющий канал для установки сборки ДПЗ (на реакторе В- 320 сборка ДПЗ может быть установлена только в ТВС, в которой отсутствует кластер). Радиусыгиба каналов дляборок ДПЗ составляют не менее 1200 мм. Каналы дляборок ДПЗ над верхней плитой объединяются в 16 стояков ЭВ, по четыре канала в каждом стояке. 10 стояков расположены на периферии верхней плиты, 6 стояков ЭВ – в центральной части плиты. Такому расположению соответствует размещение патрубков на крыше реактора.

К верхней плите крепится опорная обечайка с фланцем, через который БЗТ прижимается крышкой верхнего блока (ВБ) к головкам кассет активной зоны реактора. На реакторе В-320 жесткие упоры от всплывания внутрикорпусной шахты конструктивно выполнены на опорном фланце БЗТ в трех местах.

На верхней плите имеются отверстия для транспортировки и технологических операций с БЗТ. Для обеспечения циркуляции теплоносителя под крышкой верхнего блока в средней и верхней плитах предусмотрена перфорация, а во фланце опорной обечайки – щели. На внутренней поверхности опорной обечайки размещаются необлучаемые температурные образцы-свидетели корпусной стали.

Блок защитных труб ставится нижней плитой на подпружиненные головки кассет, тем самым поджимая их и препятствуя возникновению их вибрации, и в свою очередь сам через закрепленные в трех местах опорного фланца планки поджимается сверху фланцем крышки при затяжке главного разъема. Перфорированная обечайка БЗТ предназначена для выравнивания

скоростей потоков теплоносителя, выходящего в кольцевую камеру верхних выходных патрубков реактора. Обечайка состоит из нижней цилиндрической части диаметром 3480 мм, средней части в виде усеченного конуса и верхней цилиндрической части диаметром 2930 мм. Толщина обечайки 50 мм.

Верхняя обечайка БЗТ предназначена для размещения и закрепления на ней верхней плиты, для передачи прижимающего усилия от крышки реактора к БЗТ и фиксации в плане верхней части БЗТ. Верхняя обечайка цилиндрической формы диаметром 3360 мм и имеет переменную толщину: у основания 75 мм, в верхней части – 45 мм. Верхняя обечайка устанавливается и закрепляется на средней плите. Обечайка имеет в средней части наружной поверхности бурт с закрепленными на нем регулировочными пластинами. Бурт обечайки воспринимает и передает прижимающее усилие от крышки при установленном на корпус реактора ВБ. На внутренней поверхности обечайки установлены и закреплены в пеналах контейнеры со сборками “тепловых” образцов-свидетелей корпусной стали. На внешней поверхности верхней обечайки БЗТ закреплены 3 шпонки. При установке БЗТ в реактор эти шпонки входят в шпоночные пазы, выполненные в верхней обечайке шахты, и фиксируют верхнюю часть БЗТ в плане относительно шахты.

1.1.5 Верхний блок с крышкой

ВКУ реактора выполнены выемными для обеспечения возможности осуществления перегрузки и контроля внутренней поверхности корпуса реактора.

На фланец корпуса реактора устанавливается верхний блок (ВБ), который внутренними поверхностями фланца крышки прижимает:

- фланец шахты к корпусу реактора через упругие трубчатые элементы;
- БЗТ – к подпружиненным головкам ТВС через пластины, закрепленные на бурте верхней обечайке БЗТ.

В собранном реакторе между буртом верхней обечайки БЗТ и фланцем шахты обеспечен зазор 0,5 мм. Уплотнение фланцев корпуса и крышки реактора (главного разъема реактора) обеспечивается комплектом деталей главного уплотнения реактора. На крышке реактора устанавливаются металлоконструкция и траверса, образующие совместно с крышкой верхний блок реактора (рисунок 7).

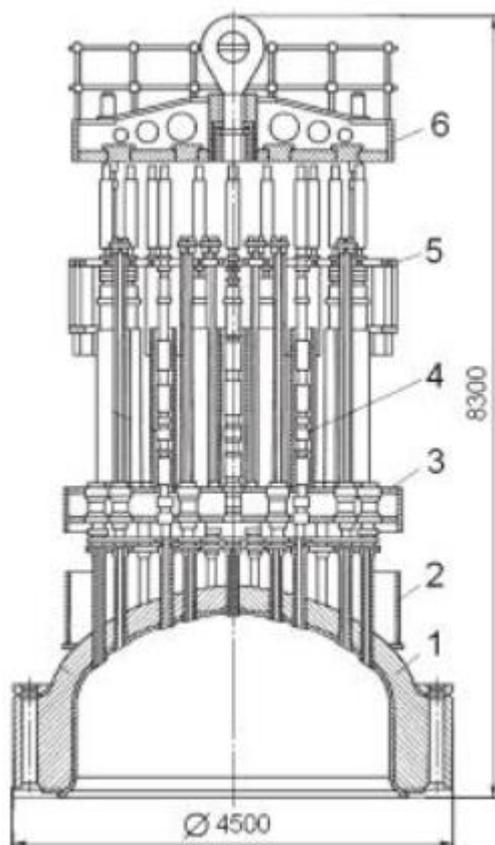


Рисунок 7 – Верхний блок с крышкой:

- 1 – траверса; 2 – дистанционирующая решетка; 3 – привод ШЭМ; 4 – каркас;
5 – обечайка; 6 – крышка

На верхний блок устанавливается блок электроразводок (БЭР). На БЭР закрепляется кабельная разводка от электрооборудования приводов СУЗ, от датчиков каналов температурного контроля и каналов нейтронного измерения системы ВРК и сигнализатора течи патрубков крышки ВБ. Шлейфы подсоединяются с одной стороны к штепсельным разъемам на оборудовании ВБ,

а с другой стороны – к штепсельным разъемам на панели бетонной шахты реактора.

Корпус и крышка реактора окружены теплоизоляцией с обеспечением доступа для осмотра и контроля состояния металла.

Верхний блок предназначен для: уплотнения главного разъема реактора; размещения и закрепления приводов СУЗ, каналов нейтронного измерения, каналов температурного контроля, воздушника реактора; уплотнения разъемов и выводов приводов СУЗ, КНИ, ТК и воздушника реактора; создания проектного прижимного усилия на шахту, БЗТ.

Верхний блок состоит из следующих основных узлов: крышки, металлоконструкции, траверсы, приводов СУЗ.

Верхний блок представляет собой конструкцию, состоящую из крышки с патрубками, из металлоконструкций с траверсой и установленных приводов системы управления и защиты реактора, выводов разъемов КНИ и ТК.

Материал верхнего блока: крышка – 15Х2МФА, металлоконструкция – ВСтЗ, чехол, привода, механическая часть – 08Х18Н10Т. Масса верхнего блока – около 116 т.

Крышка реактора является одним из основных узлов верхнего блока и предназначена для уплотнения реактора, размещения приводов ШЭМ, размещения выводов коммуникаций системы внутриреакторного контроля (ВРК) и их уплотнения, удержания от всплытия кассет, БЗТ и шахты реактора. Крышка реактора имеет тарельчатую форму и представляет собой штампованную конструкцию, состоящую из “усеченного” эллипсоида и фланца.

На крышке размещаются: патрубки СУЗ, ТК, КНИ и воздушника реактора; чехловые трубы приводов СУЗ; металлоконструкция верхнего блока; трубопровод воздушника реактора.

В эллиптической части крышки выполнено 92 отверстия, в которых установлены и обварены 61 патрубок СУЗ, 16 патрубков КНИ, 14 патрубков ТК и 1 патрубок воздушника реактора. На наружной поверхности крышки

приварено также 6 бобышек с резьбовыми гнездами для крепления штанг металлоконструкции верхнего блока. Фланец крышки выполнен цельнокованным. Во фланце выполнено 54 отверстия диаметром 180 мм под шпильки главного уплотнения реактора и резьбовые гнезда для закрепления системы центровки верхнего блока и секторов промежуточного кольца.

Патрубки СУЗ, ТК, КНИ и воздушника реактора приварены к крышке прочноплотными швами через переходную наплавку, выполненную в теле крышки в нижней части отверстий. Внутренняя поверхность каждого патрубка изолирована от контакта с теплоносителем приваренными рубашками из нержавеющей стали.

Крышка изготовлена из углеродистой низколегированной высококачественной стали марки 15Х2НФМА. Нижняя торцевая и внутренняя поверхности крышки покрыты антикоррозионной наплавкой из нержавеющей стали толщиной 8 мм.

На торцевой поверхности фланца предусмотрена контактная поверхность для прутковых прокладок уплотнения главного разъема. Все патрубки СУЗ, КНИ, ТК имеют одинаковые присоединительные размеры фланцевых разъемов с канавками для установки двух прокладок: никелевой для собственно уплотнения разъема и асбестовой – для образования полости сбора протечек. Во всех фланцах указанных патрубков (91 патрубков) сделаны отверстия с трубочками, которые группируются и заводятся в 6 датчиков контроля плотности разъемов патрубков.

Металлоконструкция ВБ предназначена для создания единой жесткой конструкции, обеспечивающей транспортировку ВБ и закрепление: чехлов приводов СУЗ; трубопровода воздушника реактора; коллекторов и направляющих каналов охлаждения электромагнитов приводов СУЗ; трубопроводов и сигнализаторов течи системы контроля протечек патрубков СУЗ, ТК и КНИ; траверсы ВБ.

Металлоконструкция ВВ реактора состоит из каркаса и 6 штанг. Каркас металлоконструкции состоит из: направляющих труб; воздушного коллектора; плиты верхней; решетки дистанционирующей; шестигранных труб.

Штанги выполнены в виде стержней круглого сечения, которые вворачиваются на резьбе в бобышки, приваренные к наружной поверхности крышки. Штанги обеспечивают создание жесткой конструкции ВВ и его транспортировку. Направляющие трубы устанавливаются на штанги и обеспечивают закрепление на них всех элементов металлоконструкции.

Воздушный коллектор состоит из двух плит и обечайки и обеспечивает отвод воздуха, охлаждающего электромагниты приводов СУЗ. Шестигранные трубы размещаются между верхней плитой коллектора и верхней плитой каркаса. Шестигранные трубы образуют тракт движения охлаждающего воздуха вдоль защитных чехлов приводов СУЗ. Верхняя плита каркаса и верхняя плита коллектора прижимают и дистанционируют шестигранные трубы с помощью штифтов, установленных на плитах в углах шестигранников труб. Решетка дистанционирующая обеспечивает с помощью ограничивающих стаканов центровку приводов СУЗ ограничителем перемещений приводов в горизонтальном направлении при сейсмических воздействиях.

На промежуточную плиту установлены вертикально 61 тонкостенная шестигранная нержавеющая труба, служащая для организации воздушного охлаждения блоков электромагнитов приводов ШЭМ и шесть коробок системы контроля плотности разъемов патрубков.

Каркас устанавливается на шесть штанг, предварительно ввернутых до упора в резьбовые гнезда бобышек крышки реактора, и закрепляется втулками и гайками. На вертикальные трубы каркаса устанавливается дистанционирующая решетка. Дистанционирующая решетка служит для центровки приводов ШЭМ и размещения датчиков указателя положения при монтаже и демонтаже верхнего блока, установленного на корпус реактора.

Траверса предназначена для транспортировки ВБ и предотвращения вылета привода СУЗ при обрыве защитного чехла или патрубка СУЗ на крышке реактора.

Траверса ВБ состоит из:

- круглой плиты с шестью отверстиями под направляющие трубы ВБ;
- усилительных радиальных ребер, приваренных к верхней поверхности плиты;
- серьги под крюк крана, закрепленной в центре плоскости плиты;
- ограждения, закрепленного на верхней поверхности плиты. Траверса устанавливается и закрепляется сверху каркаса металлоконструкции ВБ на направляющих трубах.

1.2 Эффективный коэффициент размножения нейтронов

Для осуществления цепной реакции деления необходимо создать размножающую среду, состоящую из чистого делящегося вещества или делящегося вещества и замедлителя, состав которой и обеспечивает возможность развития реакции. Следует учесть, что в этой среде неизбежно будут присутствовать конструкционные материалы. Однако подбор размножающей среды с нужными параметрами еще не обеспечивает все условия для цепной реакции. При небольших размерах, а соответственно и массе размножающей среды большая часть возникающих в ней нейтронов будет вылетать наружу, не успев вызвать делений, и самоподдерживающаяся цепная реакция (СЦР) не возникнет. Утечка нейтронов из объема с размножающей средой приводит к тому же результату, что и их поглощение без деления.

По мере увеличения размеров размножающей среды увеличивается средняя длина пути нейтронов в ней, а следовательно, и число столкновений с ядрами с последующим делением и возникновением новых нейтронов. Для описания поведения реактора во времени был введен коэффициент размножения $k_{эф}$ – отношение числа нейтронов в последующем поколении к числу нейтронов

в предыдущем. В такой трактовке при увеличении размеров среды $k_{эф}$ растет от нуля при нулевой вероятности делений до величин, больших единицы, при лавиноподобном росте числа нейтронов в ряду поколений.

При $k_{эф}$, равном единице, интенсивность процесса делений не меняется во времени – процесс является самоподдерживающимся, и такая система называется критической. При $k_{эф} < 1$ скорость делений будет уменьшаться, и в этом случае систему называют подкритической. При $k_{эф} > 1$ система надкритическая.

Минимальная масса делящегося материала, необходимая для осуществления самоподдерживающейся реакции деления, называется критической массой. Если масса превысит критическую, то в каждом следующем поколении будет рождаться больше нейтронов, чем в предыдущем, и цепная реакция будет развиваться. Значение критической массы зависит от свойств делящегося нуклида (^{235}U или ^{239}Pu), состава размножающей среды и ее окружения. Величина критической массы может меняться от нескольких сот граммов в экспериментальных устройствах до десятков килограммов в ядерных боеголовках и нескольких тонн в больших энергетических реакторах. Рассмотрим ядерный реактор на естественном уране. В нем может возникнуть самоподдерживающаяся цепная реакция, если число вторичных нейтронов, рожденных при делении и способных вызвать дальнейшие деления, оказывается достаточным для того, чтобы поддерживать скорость деления в реакторе на постоянном уровне.

Баланс нейтронов в ядерном реакторе определяется тремя процессами. С одной стороны образование нейтронов, в процессе реакций деления, с другой – убыль, связанная с поглощением и утечкой.

Для установления самоподдерживающейся цепной реакции необходимо, чтобы по крайней мере один нейтрон, образованный в каждом делении, вызывал другое деление.

Это условие легко выразить в терминах коэффициента размножения. Размножающие свойства среды бесконечных размеров (утечка отсутствует)

характеризуется величиной k_{∞} – коэффициентом размножения в неограниченной протяженной однородной мультиплицирующей среде. Коэффициент размножения определяется как отношение числа нейтронов одного поколения к числу нейтронов предыдущего поколения:

$$k_{\infty} = \frac{N_1}{N_0}$$

Баланс нейтронов в реакторе складывается из образования новых нейтронов в процессе деления ядерного топлива (в среднем 2,5 быстрых нейтрона на один акт деления), поглощения их ядрами различных материалов активной зоны и утечки нейтронов за пределы активной зоны.

Для поддержания цепной реакции деления необходимо равенство скоростей образования и убыли нейтронов. Рассмотрим бесконечную размножающую среду, что предполагает отсутствие утечки нейтронов. Остаются два конкурирующих между собой процесса - образование и поглощение нейтронов.

Выделим n_1 нейтронов (назовем их нейтронами первого поколения), образовавшихся при делении ядер ^{235}U тепловыми нейтронами. Часть нейтронов деления имеет $E = 1$ МэВ и может, следовательно, вызвать деление ядер ^{238}U (значение пороговой энергии деления $^{238}\text{U} \sim 1$ МэВ). В результате число быстрых нейтронов увеличится в μ раз. Множитель, учитывающий вклад нейтронов делений ^{238}U в общее число нейтронов, называется коэффициентом размножения на быстрых нейтронах.

Итак, начнут замедляться $n_1\mu$ нейтронов. При замедлении нейтроны проходят область энергий от 2 КэВ до ~ 6 эВ, где сечение поглощения ^{238}U имеет характерные пики-резонансы, и вероятность поглощения на них для нейтрона, имеющего энергию, соответствующую резонансу, особенно велика. Захватом нейтронов в других компонентах активной зоны в данном энергетическом интервале можно пренебречь. До тепловых энергий замедлится только $n_1\mu\varphi$ нейтронов, где φ – вероятность избежать резонансного поглощения нейтронами на ядрах ^{238}U .

Тепловые нейтроны поглощаются как топливом, так и замедлителем. Некоторая доля тепловых нейтронов поглотится замедлителем и конструкционными материалами. Нас же интересует число нейтронов, поглощенное топливом. Для этого вводится коэффициент θ , который представляет собой отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в топливе, к полному числу поглощенных тепловых нейтронов. Другими словами, θ есть вероятность для теплового нейтрона поглотиться в топливе и называется коэффициентом использования тепловых нейтронов. Таким образом, число тепловых нейтронов, поглощенных топливом, равно $n_1 \mu \phi \theta$.

Поглощение нейтрона в ядерном топливе приводит практически к двум конкурирующим событиям – делению ядра (n,f) и радиационному захвату (n, γ). Часть из $n_1 \mu \phi \theta$ нейтронов вызовет деление ядер ^{235}U , в результате чего образуются новые нейтроны деления (нейтроны второго поколения). Вводится понятие η которое по определению равно отношению числа вторичных нейтронов деления к числу поглощенных в топливе первичных тепловых нейтронов. Другими словами, η – есть выход нейтронов в результате деления ядер на один поглощенный нейтрон.

Тогда число быстрых нейтронов второго поколения $n_2 = n_1 \mu \phi \theta \eta$. Отношение числа нейтронов данного поколения к числу нейтронов предыдущего поколения в бесконечной однородной размножающей среде есть коэффициент размножения.

$$k_{\infty} = \mu \phi \theta \eta$$

Реальный реактор имеет конечные размеры, поэтому его размножающие свойства, характеризующие эффективным коэффициентом размножения нейтронов k_{∞} , который равен отношению скорости образования нейтронов к сумме скоростей поглощения нейтронов. В символическом реакторе бесконечных размеров утечки нейтронов нет, поэтому $k_{эф} = k_{\infty}$. Для реального стационарно работающего реактора с установившимся потоком нейтронов должно выполняться условие критичности: $k_{эф} = 1$. Если это условие в реакторе

не выполняется, то плотность нейтронов изменяется во времени: при $k_{эф} > 1$ возрастает, а при $k_{эф} < 1$ уменьшается. Очевидно, что относительная утечка нейтронов тем больше, чем меньше геометрические размеры реактора. Действительно, утечка нейтронов пропорциональна площади поверхности реактора S , а рождение – его объему V . Отношение S/V , например для шара равно $3/R$, т.е. относительная утечка тем меньше, чем больше радиус. Размеры, при которых $k_{эф}$ становится равным 1 и начинается самоподдерживающаяся цепная реакция, называются критическими. Любой реактор, работающий в стационарном режиме, имеет $k_{эф} = 1$, при этом если размеры реактора превышают критические, в него вводят добавочные поглотители, уменьшающие $k_{эф}$ и поддерживающие стационарное состояние.

Коэффициент размножения в бесконечной среде не может в полной мере описывать жизненный цикл нейтронов в реакторе, поскольку не учитывает их утечку. В реальном реакторе утечка нейтронов играет большую роль в нейтронном балансе. Поэтому, для реактора конечных размеров вводится эффективный коэффициент размножения:

$$k_{эф} = k_{\infty} \cdot P$$

где P – вероятность нейтрону избежать утечки [2].

1.3 Методы расчета

В ходе работы проводились программные расчеты в среде Wolfram Mathematica. Использовался самостоятельно созданный код, предназначенный для нейтронно-физического расчета реактора. В процессе расчета вводились такие параметры, как материал топлива, замедлителя, теплоносителя, конструкционных материалов, обогащение топлива, геометрические параметры (шаг расположения твэлов, радиусы твэла и таблетки), также вводились коэффициенты неравномерности по оси и объему, отношение высоты АЗ к диаметру, поправка на размещение регулирующих стержней.

Исследовалось влияние шага расположения твэлов и радиуса таблетки на эффективный коэффициент размножения. Полученные данные систематизировались в таблицы и использовались для построения графиков в пакете Microsoft Excel.

После получения данных была выведена теоретическая зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от шага расположения твэлов и радиуса топливной таблетки.

Далее производилась аппроксимация полученных данных через специальный онлайн-сервис «Аппроксимация онлайн».

По полученной аппроксимации выводились зависимости эффективного коэффициента размножения от шага расположения твэлов и радиуса топливной таблетки.

1.4 Wolfram Mathematica

Wolfram – интерпретируемый язык функционального программирования, составляющий лингвистическую основу системы, позволяющий расширять её возможности; более того, система Mathematica в значительной степени написана на языке Wolfram, хотя некоторые функции, особенно относящиеся к линейной алгебре, в целях оптимизации реализованы на Си.

Язык поддерживает и процедурное программирование с применением стандартных операторов управления выполнением программы (циклы и условные переходы), и объектно-ориентированный подход, допускает отложенные вычисления.

Mathematica – система компьютерной алгебры, широко используемая для научных, инженерных, математических расчётов. Разработана в 1988 году Стивеном Вольфрамом, дальнейшим развитием системы занята основанная им совместно с Теодором Греем компания Wolfram Research.

Основные аналитические возможности:

– решение систем полиномиальных и тригонометрических уравнений и неравенств, а также трансцендентных уравнений, сводящихся к ним;

- решение рекуррентных уравнений;
- упрощение выражений;
- нахождение пределов;
- интегрирование и дифференцирование функций;
- нахождение конечных и бесконечных сумм и произведений;
- решение дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных;
- преобразования Фурье и Лапласа, а также Z-преобразование;
- преобразование функции в ряд Тейлора, операции с рядами Тейлора: сложение, умножение, композиция, получение обратной функции.

Система также осуществляет численные расчёты: определяет значения функций (в том числе специальных) с произвольной точностью, осуществляет полиномиальную интерполяцию функции от произвольного числа аргументов по набору известных значений, рассчитывает вероятности.

Теоретико-числовые возможности – определение простого числа по его порядковому номеру, определение количества простых чисел, не превосходящих данное; дискретное преобразование Фурье; разложение числа на простые множители, нахождение НОД и НОК.

Также в систему заложены линейно-алгебраические возможности – работа с матрицами (сложение, умножение, нахождение обратной матрицы, умножение на вектор, вычисление экспоненты, взятие определителя), поиск собственных значений и собственных векторов.

Система результаты представляет как в алфавитно-цифровой форме, так и в виде графиков. В частности, реализовано построение графиков функций, в том числе параметрических кривых и поверхностей; построение геометрических фигур (ломаных, кругов, прямоугольников и других); построение и манипулирование графами. Кроме того, реализовано воспроизведение звука, график которого задаётся аналитической функцией или набором точек.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Выполнение грамотной научно-исследовательской работы требует наличия экономической оценки всех её элементов: как объекта исследования, так и методов, которые для этого используются.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести SWOT-анализ;
- провести планирование научно-исследовательской работы;
- произвести расчёт бюджета научно-исследовательской работы;
- определить ресурсную эффективность исследования.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Современные мировые тенденции определяют вектор развития любой технологической, научной и прочих отраслей. Особенно сильно поднимается вопрос о необходимости планирования и организации всех проводимых работ, а именно – с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Таким образом, существует потребность в определении затрат на проведение научно-исследовательских работ и их продолжительности, что, в свою очередь, определяет экономическую эффективность и конкурентоспособность рассматриваемого в данной работе реактора PWR. Для того чтобы узнать это, был произведен анализ потребителей. В качестве первого критерия, а именно потребителей были выбраны основные ядерные паро-производящие установки, эксплуатируемые в России. Вторым критерием было выбрано количество данных установок. В таблице представлена карта сегментирования рынка в России ядерных паропроизводящих установок на май 2022 года.

Таблица 4 – Карта сегментирования рынка ЯППУ

Количество ЯППУ	Тип ЯППУ		
	PWR	РБМК-1000	БН-800
10-13			
2-10			
1-2			

По итогам составления карты сегментирования Российского рынка ЯППУ видно, что энергоблок с ядерной установкой типа PWR преобладает на российском рынке. В ЯППУ типа PWR в качестве теплоносителя используется легкая вода, а ядерная установка с легкой водой в качестве теплоносителя наиболее привлекательны, так как легкая вода имеет ряд преимуществ по сравнению с остальными типами теплоносителей. Самые главные преимущества – это ее дешевизна и доступность. Этим и объясняется то, почему ЯППУ с ней так распространены на Российском рынке. Также данный вид ЯППУ активно экспортируется за рубеж [6].

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 5. В качестве конкурирующих разработок были приняты: К1 – РБМК-1000, К2 – БН-800. 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 единицу.

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.

В первом случае ЯППУ в качестве теплоносителя используется легкая вода, во втором случае теплоносителем является жидкий натрий, в качестве топлива обогащенный уран (в БН-800 МОХ-топливо).

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентноспособность		
		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. Удобство	0,02	5	4	3	0,1	0,08	0,06
2. Энергоэкономичность	0,04	5	4	3	0,25	0,16	0,12
3. Надежность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
4. Уровень воздействия на окружение	0,01	5	4	5	0,05	0,04	0,05
5. Безопасность	0,25	5	4	4	1,25	1,00	1,00
6. Материалозатратность	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Стоимость топлива в зависимости от обогащения по изотопу U ²³⁵	0,1	4	5	3	0,4	0,5	0,3
2. Стоимость теплоносителя	0,05	4	4	3	0,12	0,12	0,09
3. Конкурентоспособность энергетической установки	0,05	5	3	3	0,05	0,03	0,03
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	5	3	5	1	0,6	1
5. Обслуживание после введения в эксплуатацию	0,07	5	2	5	0,35	0,14	0,28
6. Длительность топливного цикла	0,18	5	3	4	0,90	0,54	0,72
Итого	1	52	41	42	3,98	3,03	3,29

Из данного анализа видно, что рассматриваемая ЯППУ (PWR) не имеет особых преимуществ перед конкурентами, но она более сбалансирована, имеет широкое распространение на рынке ядерной энергетике. Ядерная энергетическая установка БН-800 является основным конкурентом из-за возможности наработки ядерного горючего, малого запаса реактивности и отсутствия замедлителя, что увеличивает будущую перспективность данной ядерной энергетической установки. Но данная разработка пока мало распространена на рынке, обладает

меньшей мощностью, имеет новую эксплуатационную технологию, требует больших материальных ресурсов и неоднократных физических экспериментов. Основным недостатком ядерной установки РБМК-1000 являются то, что на данной установке произошла самая масштабная авария в истории человечества и было принято решение, что дальнейшую разработку и модернизацию этой установки прекратить, а для оставшихся энергоблоков продолжить эксплуатацию до полной выработки энергоресурса.

4.3 SWOT-анализ

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

Сильными сторонами могут являться факторы, которые отражают наиболее конкурентоспособную сторону рассматриваемой установки.

Сильными сторонами реакторной установки PWR можно назвать следующие свойства и особенности:

- использование корпусной схемы, что увеличивает безопасность установки;
- использование активных и пассивных систем безопасности;
- доступность и дешевизна теплоносителя;
- наличие высокой замедляющей способности, а следовательно, высокое энерговыделение с единицы объема.

Слабыми сторонами считаются те особенности рассматриваемого объекта, которые могут препятствовать его наиболее выгодному и беспрепятственному использованию.

Слабыми сторонами рассматриваемой ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности:

- относительно высокое поглощение нейтронов водой, а поэтому должно использоваться только обогащенное топливо, что приводит к увеличению его стоимости;
- высокое давление при энергетически приемлемых температурах;
- коррозионная активность воды с конструкционными материалами, что приводит к использованию двуокиси урана и нержавеющей стали, это ухудшает баланс нейтронов увеличивает затраты на эксплуатацию.

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.

К возможностям данной ЯЭУ можно отнести:

- снижение стоимости электроэнергии;
- предоставление дополнительных рабочих мест;
- расширение производства и мощностей для обеспечения работоспособности ЯЭУ.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

К угрозам можно отнести:

- природные катаклизмы: землетрясения, цунами, смерчи;
- снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок;
- угроза диверсионных и террористических действий в отношении ЯЭУ.

В таблице 6 представлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в бакалаврской работе.

Таблица 6 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Использование корпусной схемы увеличивает безопасность установки; использование активных и пассивных систем безопасности; 2. Доступность, а следовательно дешевизна воды, а также отработаны технологии по ее получению; 3. Наличие высокой замедляющей способности, а следовательно высокое энерговыделение с единицы объема. 	<p>Слабые стороны:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Относительно высокое поглощение нейтронов водой, а поэтому должно использоваться только обогащенное топливо, что приводит к увеличению его стоимости; 2. Высокое давление при энергетически приемлемых температурах; 3. Коррозионная активность воды с конструкционными материалами, что приводит к использованию двуокиси урана и нержавеющей стали, это ухудшает баланс нейтронов увеличивает затраты на эксплуатацию.
<p>Возможности:</p> <p>В 1. Для условий России вода является более дешевым материалом в качестве теплоносителя;</p> <p>В 2. Предоставление дополнительных рабочих мест;</p> <p>В 3. Расширение производства и мощностей для обеспечения работоспособности ЯЭУ.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удачное совмещение конструкционных материалов в установке, обеспечивает надежную эксплуатацию и высокие показатели выработки электроэнергии. 2. Системы безопасности установки отвечают всем требованиям, которые предъявляются к современным АЭС, 3. Увеличение привлекательности данной энергетической установки среди потенциальных стран заказчиков данного проекта среди потенциальных стран заказчиков данного проекта 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость иметь высокое давление в реакторе усложняет конструкцию корпуса реактора и его отдельных узлов; 2. Большое сечение поглощения нейтронов водой требует увеличение обогащения ядерного топлива, что может увеличить стоимость электроэнергии; 3. Коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы;

Продолжение таблицы 6

		4. Радиоллиз воды и коррозионная активность могут вызвать некоторые трудности при переходе на одноконтурную схему.
<p>Угрозы: У1. Природные катаклизмы. У2. Снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок. У3. Наличие угрозы несанкционированных действий в отношении ЯЭУ.</p>	<p>1. Преимущества ЯППУ ведут за собой привлечение действий террористического и диверсионного характеров. 2. Преимущества реактора перед конкурентами вызывает дополнительный интерес у государства.</p>	<p>1. Наличие высокого давления делает ЯППУ уязвимой перед природными катаклизмами. 2. Возникновение аварии сможет снизить интерес к проектам подобного рода.</p>

Проведённый SWOT-анализ позволяет с достаточной для данной работы точностью определять дальнейшее положение рассматриваемого объекта на соответствующем рынке. 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.

4.4 Расчёт накопления готовности проекта

Текущее состояние работы над проектом нуждается в оценке для точного понимания всех затраченных усилий. Получаемые по итогу подобной оценки величины (величины накопления готовности работы) отображают количество процентов, на которое выполнен весь объём работ по проекту в целом по окончании текущего (i-го) этапа.

Введём некоторые обозначения:

$TP_{общ}$ – общая трудоёмкость проекта;

TP_i (TP_k) – трудоёмкость i -го (k -го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;

TP_i^H – накопленная трудоёмкость i -го этапа проекта по его завершении;

TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоёмкость работ, выполняемых j -м участником на i -м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, в нашем примере $m = 2$.

Степень готовности определяется формулой 36:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{общ}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{общ}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}} \quad (32)$$

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

Таблица 7 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	TP_i , %	CG_i , %
Постановка задачи	3,74	3,74
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	7,05	10,79
Подбор и изучение материалов по тематике	14,57	25,36
Разработка календарного плана	4,11	29,47
Обсуждение литературы	4,48	33,94
Выбор исходных параметров	12,69	46,64
Методика расчета	20,16	66,80
Нейтронно-физический расчет	17,08	83,87
Оформление расчетно-пояснительной записки	6,40	90,28
Оформление графического материала	3,74	94,01
Подведение итогов	5,99	100,00

Очевидно, что наибольшее количество трудозатрат приложено на этапах подбора и изучения материала по тематике, проработки методики расчёта и при его непосредственном осуществлении, когда как этапы, включающие подбор и оформление различного рода документов, подготовку необходимой базы для проведения практических изысканий по отдельности потребовали меньше времени и сил.

4.5 Организация и планирование работ

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

Данный пункт представляет собой полный перечень проводимых работ, где определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным достаточно объективным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей не превышает двух, предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные сведения о выполнении данной работы представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%

Продолжение таблицы 8

Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 20% И – 100%
Выбор исходных параметров	НР, И	НР – 100% И – 70%
Методика расчета	НР, И	НР – 100% И – 80%
Нейтронно-физический расчет ЯР	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

Как видно из представленной выше таблицы, роль научного руководителя в ходе выполнения всех видов работ сводится к направляющей и контролирующей функциям, когда как инженер является исполнительным звеном – он выполняет все поставленные задачи для достижения установленной цели.

4.5.1 Продолжительность этапов работ

Продолжительность этапов работ могут быть рассчитаны следующими двумя методами:

- технико-экономическим;

- опытно-статистическим.

Первый метод подразумевает наличие и использование соответствующей нормативной базы трудоёмкости всех применяемых в работе процессов, так как они по своей природе являются повторяющимися с достаточно высокой частотой при условии стандартной, устойчивой обстановки. В связи с тем, что подобными нормативами исполнитель не обладает в виду нестандартности и неравномерности распределения рабочих усилий применяется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Способ с применением достаточно актуальных, как с точки зрения времени, так и со стороны реальной применимости аналогов к разрабатываемой НИР имеет ряд преимуществ: он относительно прост в исполнении и не сопряжён с большим количеством затрат. Однако на практике он может быть слишком локальным и применяться только для отдельных элементов – невозможно найти абсолютно идентичных работ.

Второй способ – экспертный – применим в ситуации, когда аналоги выполняемой НИР отсутствуют. Он предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию.

Для определения вероятных значений продолжительности работ $t_{OЖ}$ может применяться одна из двух формул.

$$t_{OЖ} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5} \quad (33)$$

$$t_{OЖ} = \frac{t_{\min} + 4t_{\text{prob}} + t_{\max}}{6} \quad (34)$$

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

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

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

Как видно из самой конструкции формул, вторая требует большего анализа каждого из элементов работы и вероятностной оценки их продолжительности, что, очевидно, усложняет все.

Для выполнения перечисленных в таблице 8 работ требуются специалисты:

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

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

Расчёт продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях:

$$T_{РД} = \frac{t_{ОЖ}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д} \quad (35)$$

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

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

Расчёт продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (36)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни;

$T_{ВД}$ – выходные дни;

$T_{ПД}$ – праздничные дни.

При учёте, что $T_{КАЛ} = 365$, $T_{ВД} = 52$, $T_{ПД} = 10$.

В приложении Ж приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоёмкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле 35. Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоёмкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента $K_{Д} = 1,15$.

Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{ож} \cdot K_{д}$. Столбцы 8 и 9 – трудоёмкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на $T_K = 1,212$. Итог по столбцу 5 даёт общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоёмкости для каждого из участников проекта. Величины трудоёмкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9 кроме итогов, позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленный в приложении 3.

4.6 Расчёт сметы на выполнение проекта

Смета на выполнение данного исследования содержит все расходы, необходимые для осуществления комплекса работ, необходимых для реализации всего спектра поставленных перед проектом задач. Расчёт полной (сметной) стоимости выполнения исследования производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

4.6.1 Расчёт затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых

непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает, так называемые, транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (транзакции). Приблизённо они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в границах, представленных в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	260	1 уп.	260
Картридж для принтера	1040	1 шт.	1040
Итого:			1300

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

$$C_{MAT} = 1300 \cdot 1,05 = 1365$$

4.6.2 Расчёт заработной платы

Данная статья расходов подразумевает суммарную заработную плату научного руководителя и инженера (исполнителя), с учётом входящих в фонд заработной платы различных премий. Основная заработная плата рассчитывается, опираясь на трудоёмкость выполнения каждого этапа и на

величину месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-м}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-м}} = \frac{МО}{25,083} \quad (37)$$

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

Пример расчёта затрат на полную заработную плату приведены в таблице 10. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из приложения А. Учёт всевозможных премий и районной надбавки осуществляется путём использования ряда коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{Доп.ЗП}} = 1,188$; $K_{\text{Р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{И}} = K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{Доп.ЗП}} \cdot K_{\text{Р}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699 \quad (38)$$

Таблица 10 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{\text{И}}$	Фон з/п, руб.
НР	37700	2217,65	17	1,699	64052,30
И	13900	534,62	26	1,699	23616,10
Итого:					87668,40

4.6.3 Расчёт затрат на страховые взносы

Затраты на страховые взносы, включающие в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование согласно ФЗ от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, водится пониженная ставка – 30,2%:

$$C_{соц} = C_{зп} \cdot 0,302 = 87668,40 \cdot 0,302 = 26475,86 \text{ руб.} \quad (39)$$

Данные взносы идут в Фонд государственного социального страхования (ФСС), Пенсионный фонд (ПФ) и Фонд медицинского страхования (ФФОМС).

4.6.4 Расчёт затрат на электроэнергию

Данные расходы подразумевают затраты на то количество электроэнергии, которая потрачена для выполнения всего проекта, то есть на работу используемого оборудования. Они рассчитываются по формуле:

$$C_{эл.об} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot C_{э} \quad (40)$$

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

$C_{э}$ – тариф на 1 кВт·час;

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

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

Время работы оборудования рассчитывается на основе суммарной трудоёмкости работ из приложения А для исполнителя (ТРД) при условии, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{об} = T_{рд} \cdot K_t \quad (41)$$

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

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

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном} \cdot K_c \quad (42)$$

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

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

Для технологического оборудования малой мощности $K_c = 1$.

Расчёт затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $C_{эл.об}$, руб.
Персональный компьютер	192	0,3	331,1
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			332,25

4.6.5 Расчёт амортизационных расходов

Данная статья подразумевает расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{AM} = \frac{H_A \cdot t_{об} \cdot C_{об} \cdot n}{F_D} \quad (43)$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

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

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

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

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Например, для ПК в 2022 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне, F_D равен:

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

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

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

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

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать:

$$C_{AM} = \frac{0,4 \cdot 208 \cdot 100000 \cdot 1}{2384} = 3489,93$$

4.6.6 Расчёт прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражаются расходы на выполнение проекта, которые не могут быть учтены в предыдущих статьях или же которые не могут быть предвидены. Их следует принимать равными 10 % от суммы всех предыдущих расходов:

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

$$= (1365 + 87668,40 + 26475,86 + 332,25 + 3489,93) \cdot 0,1 = 11933,14 \text{ руб.} \quad (44)$$

4.6.7 Расчёт суммарной себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Нейтронно-физический расчет реактора PWR» (таблица 12).

Таблица 12 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма,	
		руб.	%
Материалы и покупные изделия	$C_{МАТ}$	1365,00	1,04
Основная заработная плата	$C_{ЗП}$	87668,40	66,79
Страховые взносы	$C_{СОЦ}$	26475,86	20,17
Расходы на электроэнергию	$C_{ЭЛ.ОБ}$	332,25	0,25
Амортизационные отчисления	$C_{АМ}$	3489,93	2,66
Прочие расходы	$C_{ПРОЧ}$	11933,14	9,09
Итого:		131264,58	100,00

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 131264,58$ руб. Проведение анализа вклада каждой из статей в суммарные затраты на работу выявило, что основной вклад вносят отчисления на заработную плату участников проекта, тогда как расходы на материалы и обеспечение электроэнергией практически не повлияли на финальную величину.

4.6.8 Расчёт прибыли

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

$$G = C \cdot 0,2 = 111359,72 \cdot 0,2 = 22271,94 \text{ руб.} \quad (45)$$

4.6.9 Расчёт НДС

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

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2 = (111359,72 + 22271,94) \cdot 0,2 = 26726,33 \text{ руб.} \quad (46)$$

4.6.10 Цена разработки проекта

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$\begin{aligned} C_{\text{НИР}} &= C + G + \text{НДС} = \\ &= 111359,72 + 22271,94 + 26726,33 = 160357,99 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (47)$$

4.6.11 Оценка экономической эффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности [6]. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации

технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{фин}^{исп} = \frac{\Phi_{Pi}}{\Phi_{max}} \quad (48)$$

где $I_{фин}^{исп}$ – 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, либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Ввиду закрытости или отсутствия данных экономической эффективности и определение срока окупаемости данного проекта невозможно.

Список использованных источников

1. Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора PWR Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 116 с.
2. Физика ядерных реакторов : практические задачи по их эксплуатации / В. И. Владимиров. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – Москва : ЛИБРОКОМ, 2008. – 478 с.
3. Колпаков Г.Н. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие / Г.Н. Колпаков, О.В. Селиваникова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
4. Метод наименьших квадратов / Калькулятор онлайн / Регрессия [Электронный ресурс]. – 2022 – Режим доступа: <https://www.kontrolnaya-rabota.ru/s/teoriya-veroyatnosti/method-naimenshih-kvadratov/> – Загл. с экрана (дата обращения: 26.05.2022).
5. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие / Бойко В. И., Кошелев Ф. П., Шаманин И. В., Колпаков Г. Н – Томск: Томский политехнический университет, 2015. – 192 с.
6. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
7. Российская Федерация. Законы. Об основах охраны труда в Российской Федерации (с изменениями на 26 декабря 2005 года) : Федеральный закон № 181-ФЗ : [Принят Государственной Думой 23 июня 1999 года]. – Москва, 1999. – 20 с.
8. Российская Федерация. Трудовой кодекс Российской Федерации (с изменениями на 20 апреля 2021 года) : Федеральный закон № 197-ФЗ : [Принят Государственной Думой 21 декабря 2001 года]. – Москва, 2021 – 246 с.
9. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: дата введения 2021-03-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 21.04.2022). – Текст : электронный.

10. crabo.ru : компьютерный портал : сайт. – Москва, 2021. – URL: <https://crabo.ru/> (дата обращения: 23.04.2022). – Текст: электронный.
11. studwood.ru : Учебные материалы онлайн : сайт. – 2017-2021. – URL: <https://studwood.ru/> (дата обращения: 26.04.2022). – Текст: электронный.
12. studbooks.net : Студенческая библиотека онлайн : сайт. – 2013-2021. – URL: <https://studbooks.net> (дата обращения: 28.04.2022). – Текст: электронный.
13. СНиП 41-01-2003. ОТОПЛЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ: дата введения 2004-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035579> (дата обращения: 05.05.2022). – Текст : электронный.
14. Vents : сайт. – 2017-2021.– URL: <https://www.vents.ru/> (дата обращения 07.05.2022). – Текст: электронный.
15. Vuzlit.ru : Архив студенческих работ : сайт. – 2017-2021. – URL: <https://vuzlit.ru>. (дата обращения: 07.05.2022). – Текст: электронный.
16. ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере: дата введения 2001-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030047/> (дата обращения 10.05.2022). – Текст: электронный.
17. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность: дата введения 1983-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (дата обращения: 12.05.2022). – Текст: электронный.
18. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (с изменениями на 27 декабря 2018 года) : Федеральный Закон № 123-ФЗ : [Принят Государственной Думой 4 июля 2008 года]. – Москва, 2018. – 103 с.
19. МЧС России: официальный сайт. – Москва, 2021. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://www.mchs.gov.ru/> (дата обращения: 13.05.2022). – Текст: электронный.
20. Онлайн-журнал про охрану труда : сайт. – 2017-2021. – URL: <https://ohranatryda.ru/> (дата обращения: 13.05.2022). – Текст: электронный.

21. propomosch.ru : сайт. – 2021. – URL: <https://propomosch.ru/> (Дата обращения 13.05.2022). – Текст: электронный.

Приложение А

(обязательное)

Изменение геометрических параметров

Таблица – Изменение радиуса топливной таблетки

$K_{эф}$	$R_{топ}$
0,28532	0,0785
0,553444	0,0985
0,774211	0,1185
0,950515	0,1385
1,08848	0,1585
1,19464	0,1785
1,27466	0,1985
1,33329	0,2185
1,37422	0,2385
1,40019	0,2585
1,41319	0,2785
1,41458	0,2985
1,40523	0,3185
1,38543	0,3385
1,3551	0,3585
1,31369	0,3785
1,26019	0,3985
1,19305	0,4185
1,11005	0,4385
1,00821	0,4585
0,883702	0,4785
0,732143	0,4985
0,549979	0,5185
0,340026	0,5385

0,129804	0,5585
0,007612	0,5785

Таблица – Изменение шага расположения твэлов в ТВС

$K_{эф}$	h
0,173994	0,925
0,506167	0,975
0,766579	1,025
0,952717	1,075
1,0867	1,125
1,18501	1,175
1,25835	1,225
1,31369	1,275
1,45326	1,775
1,35942	2,275
1,21477	2,775
1,06397	3,275
0,923507	3,775
0,799221	4,275
0,601052	5,275
0,357731	7,275
0,189342	10,275
0,086119	15,275
0,020856	30,275
0,004904	60,275

Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б.1 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					Трд		Ткд	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	1	2	1,40	1,61	0	1,95	0
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,40	2,76	0,28	3,35	0,34
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	3	6	4,20	1,45	4,83	1,76	5,85
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,40	1,61	0,16	1,95	0,19
Обсуждение литературы	НР, И	1	2	1,40	0,32	1,61	0,58	1,95
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	2	4	2,80	3,22	2,25	3,90	2,73
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	3	6	4,2	4,83	3,86	5,85	4,68
Расчет принципиальной схемы устройства	И	4	10	6,40	0	7,36	0	8,92
Оформление расчетнопояснительной записки	И	2	3	2,40	0	2,76	0	3,35
Оформление графического материала	И	1	2	1,40	0	1,61	0	1,95
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,40	0,97	1,61	1,18	1,95
Итого:				29,40	16,93	26,33	20,52	31,91

Приложение В

(обязательное)В

Таблица В.1 – Линейный график работы

Этап	НР	И	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	
1	1,95	0	■														
2	3,35	0,34		■													
3	1,76	5,85			■	■	■										
4	1,95	0,19					■										
5	0,58	1,95						■									
6	3,90	2,73							■	■							
7	5,85	4,68								■	■						
8	0	8,92										■	■	■			
9	0	3,35													■		
10	0	1,95														■	
11	1,18	1,95														■	■

НР – ■; И – ■