

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

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Влияние неопределенности распределения бора по объему активной зоны на параметры реактора ВК-50

УДК 621.039.577.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Дисюк В.В.		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Планируемые результаты обучения

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

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

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

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ФЭУ

 (Подпись) _____ (Дата) Долматов О.Ю.
 (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Дисюк В.В.

Тема работы:

Влияние неопределенности распределения бора по объему активной зоны на параметры реактора ВК-50

Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	№3673/с от 24.05.2017
--	-----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	9.06.2017
--	-----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none"> - Топливо UO₂; - Начальное обогащение урана 3%; - Тепловая мощность – 250 МВт; - Электрическая мощность – 65 МВт; - Теплоноситель – H₂O; - Количество ТВС – 88.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none"> - Проведение литературного обзора по тематике НИР; - Влияние неопределённостей в исходных данных на разброс результатов расчёта; - Создание расчетной 3D-модели (MCU); - Оценка неравномерности выгорания бора по высоте активной зоны; - Анализ расчетных данных.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	<ul style="list-style-type: none"> - Презентация – 15 слайдов; - Чертеж – 1 лист.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Литературный обзор, Разработка и тестирование расчётной модели реакторов ВК-50 на базе кода MCU; Проведение расчетов и анализ полученных результатов.	Чертков Ю.Б.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М.В.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Литературный обзор	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Дисюк В.В.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Дисюк В.В.

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

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценочная карта конкурентных технических решений.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	– иерархическая структура работ; – SWOT-анализ; – календарный план-график реализации проекта.
3. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования	Определение ресурсоэффективности проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

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

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Дисюк В.В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа 0AM5B	ФИО Дисюк В.В.
------------------------	--------------------------

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– вредных факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, электромагнитные поля, ионизирующее излучение); – опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	– электробезопасность; – пожаробезопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– воздействие на организм человека; – приведение допустимых норм; – предлагаемые средства защиты.
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Дисюк В.В.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 94 с., 13 рис., 21 табл., 44 источников, 2 прил.

Ключевые слова: кипящий реактор малой мощности корпусной; стержень с выгорающим поглотителем; тепловыделяющая сборка; регулятор реактивности; влияние неопределённостей в исходных данных на разброс результатов расчёта; финансовый менеджмент; социальная ответственность.

Объектом исследования являются неравномерности активной зоны ядерного реактора ВК-50 с тепловой мощностью 250 МВт, топливом UO_2 , обогащением 3% и с замедлителем-теплоносителем H_2O .

Цель дипломной работы является анализ влияния бора, являющимся выгорающим поглотителем в реакторе ВК-50, на нейтронно физические параметры реактора. Влияние на такие параметры как запас реактивности и эффективность органов регулирования.

В результате исследования была определена неопределенность исходных данных, определяемых характеристиками твэлов и ТВС со «свежим» топливом. При расчетах реактора ВК-50 необходимо более детально описывать распределение ^{10}B по высоте и по азимуту ТВС. Описание чехлов сборок одной материальной зоной приводит к тому, что глубина выгорания топлива неоправданно уменьшается.

При создании более точной расчетной модели реактора ВК-50 достаточно, по-видимому, ввести не менее 2-х материальных зон для описания высотного выгорания топлива и не менее 5 материальных зон для описания распределения ^{10}B в чехлах ТВС.

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

Область применения: ядерная энергетика.

Экономическая эффективность/значимость работы высока

Обозначения и сокращения

АТЭЦ – атомная теплоэлектроцентраль

АСТ – атомная станция теплоснабжения

ВВРК (BWR) – водо-водяной реактор кипящий (корпусной)

ВК-50 – Российский ВВРК с ЕЦ, введен в эксплуатацию в 1965 г.

ЯЭУ – ядерная энергетическая установка

АЭС – атомная электростанция

ВВЭР (PWR) – водо-водяной энергетический реактор с водой под давлением

ТВС – тепловыделяющая сборка

ВТО – водно-топливное отношение

КВ – коэффициент воспроизводства

ВВЭР СКД (SCWR) – реактор с водяным теплоносителем сверхкритических параметров

РБМК – реактор большой мощности канальный (графито-водный одноконтурный кипящий)

CANDU – Канадский канальный реактор с замедлителем – тяжелой водой

BORAX – первые водо-водяные кипящие реакторы

SBWR – (Simplified) BWR – усовершенствованный реактор поколения III+ с всережимной естественной циркуляцией теплоносителя

СБЯ – сталь с добавлением бора

СВП – стержень с выгорающим поглотителем

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

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина.

Оглавление

Введение.....	10
1 Типы и особенности кипящих реакторов	15
1.1 Признаки классификации кипящих реакторов	15
1.2 Корпусной кипящий реактор с многократной циркуляцией теплоносителя	20
1.3 Канальный кипящий реактор с многократной циркуляцией теплоносителя	22
2 Описание характеристик и особенностей реактора ВК-50.....	27
2.1 Актуальность физических исследований активной зоны реактора ВК-50 ...	27
2.2 Конструктивные особенности активной зоны реактора ВК-50	32
2.3 Описание ТВС реактора	33
2.4 Описание рабочего органа ручного регулирования	35
2.5 Описание рабочего органа аварийной защиты	37
2.6 Описание твэла	39
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	42
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	43
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений	44
4.1.2 SWOT-анализ.....	46
4.2 Планирование управления научно-техническим проектом.....	48
4.2.1 Иерархическая структура работ проекта.....	48
4.2.2 Контрольные события проекта	49
4.2.3 План проекта.....	50
4.3 Бюджет научного исследования	51
4.3.1 Расчёт материальных затрат	52
4.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	54
4.3.3 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.....	56
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды	57
4.3.5 Накладные расходы.....	58

4.4 Организационная структура проекта	59
4.5 Матрица ответственности	60
4.6 Оценка сравнительной эффективности исследования	61

Введение

Осуществление кипения в активной зоне водо-водяного реактора было обусловлено стремлением упростить и удешевить конструкцию установки с не кипящей водой. Реализация в значительной степени определялась опытом эксплуатации реакторов с водой под давлением (PWR) и экспериментальных установок с парообразованием в зоне (BORAX, EBWR, VBWR).

Благодаря последовательному усовершенствованию технологии, конструкции и топливного цикла кипящие реакторы (BWR) успешно конкурируют по стоимости вырабатываемой электроэнергии с реакторами других типов и, наряду с PWR, составляют основу современной ядерной энергетики большинства стран.

Высокая экономичность реакторов BWR достигнута путем реализации следующих решений:

Повышена единичная мощность АЭС. Эта тенденция, являющаяся общей для энергетической техники, особенно отчетливо и с большим экономическим эффектом проявляется в ядерной энергетике. Так, стоимость киловатта на АЭС с кипящими реакторами фирмы «Дженерал электрик», по данным 1967 г., меняется с увеличением их мощности следующим образом: 300МВт – 194; 400 МВт – 175; 500 МВт–163; 600МВт – 153 долл и т.д. Цены последнего времени значительно выше, но соотношение остается примерно таким же. Единичная мощность действующих реакторов BWR выросла за десятилетие со 180 МВт на АЭС «Дрезден-1» (США) в настоящее время до 600МВт на АЭС «Ойстер-крик» в стадии сооружения находятся блоки мощностью 1000-1200МВт. Мощность одной циркуляционной петли выросла соответственно с 50 (1960г) до 550МВт (1971г) [1÷6]. На современных блоках, как правило, предусматриваются два питательных насоса и один турбогенератор.

Упрощена система циркуляции теплоносителя. На первых энергетических реакторах ВWR (Дрезден-1, США, Каль, Линген, ФРГ) использовались двойной цикл парообразования, вынесенные из реактора сепарационные устройства в некоторых – перегрев пара перед турбиной. Для современных установок характерны прямой цикл парообразования (впервые применен на АЭС «Гумбольт-Бей», США), встроенные в корпус реактора сепаратора пара (впервые использованы на АЭС «Гундреминген», ФРГ), отказ от огневого перегрева (применение турбин насыщенного пара с промежуточной сепарацией). Следующим этапом развития реакторов ВWR в этом направлении является использование встроенных реакторов струйных насосов (последние установки фирмы «Дженерал-электрик», в том числе Дрезден-2 и Дрезден-3) или осевых насосов, закрепляемых на крышке корпуса реактора (последние проекты ФРГ); такие решения позволяют дополнительно уменьшить внешний циркуляционный контур и сократить мощность, необходимую для прокачки теплоносителя [1÷6].

Увеличена средняя теплонапряженность активных зон и паросодержание теплоносителя путем выравнивания полей тепловыделения, уточнения ограниченной, обусловленных физикой и теплотехникой кипящих зон, более точного контроля параметров работающего реактора. Средняя теплонапряженность возросла с 27 до 50 кВт, среднее весовое содержание на выходе из зоны – с 5 до 14%.

Повышена средняя глубина выгорания топлива, разработаны твэлы с увеличенным ресурсом работы, сниженная стоимость их изготовления. Эти достижения наряду с понижением цен на обогащенный уран и способствовали значительному уменьшению топливной составляющей стоимости электроэнергии, вырабатываемой кипящими реакторами.

Опытная энергетическая установка с корпусным кипящим реактором ВК-50 была создана для изучения эксплуатационных характеристик и работоспособности одноконтурных АЭС с непосредственной выдачей пара

из реактора на турбину. Реакторная установка (РУ) ВК-50 используется для проведения исследовательских работ, таких как изучение нейтронно-физических и тепло-гидравлических характеристик реактора, вопросов работоспособности ТВС. В этом реакторе для снижения начального запаса реактивности используется выгорающий поглотитель на основе бора. Бор располагается в качестве примеси в чехлах ТВС. По проекту сборки содержание бора колеблется в пределах 0,07 – 0,1 %. Кроме того, распределение потока тепловых нейтронов по высоте имеет коэффициент неравномерности более 2. Все это приводит к большой неопределенности и неравномерности в распределении ВП по активной зоне.

Актуальность: Любая физическая установка сопровождается математическими расчетами, точность которых зависит от знания материального состава активной зоны с учетом его изменения при работе реактора. В данной работе проведен расчет изменения концентрации бора, являющегося выгорающим поглотителем, на точность определения параметров реактора.

Целью работы: анализ влияния бора, являющимся выгорающим поглотителем в реакторе ВК-50, на нейтронно физические параметры реактора.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- Провести аналитический обзор литературных источников по теме диссертации;
- Особенности работы кипящих реакторов;
- Особенности конструкции и работы реактора ВК-50;
- Расчетный анализ влияния бора (на базе кодов MCU и WIMS) на параметры реактора ВК-50;
- Анализ влияния неопределённостей в исходных данных на разброс результатов расчёта.

Научная новизна работы: заключается в повышении точности расчетных программ, сопровождающих работу реактора, и повышению параметров самого реактора в целом. Неточность знаний материального состава реактора приводит к ошибкам в прогнозе нейтронно-физических параметров реактора.

Практическая значимость работы: заключается в обобщении результатов исследований, выполненных в рамках научно-технических программ по физике реакторов, а также в практическом улучшении эксплуатационных характеристик реактора, что будет способствовать более эффективному его использованию и, как следствие, удешевлению электроэнергии.

На защиту выносятся: исследования влияния на разброс расчетных результатов следующих проектных и экспериментальных неопределенностей: неравномерность распределения урана (выгорания) по объему ТВС; неопределенность концентрации и распределения бора в чехлах ТВС; неопределенность распределения ^{10}B по высоте поглощающих частей РР (большую часть кампаний РР находятся в частично погруженном в активную зону состоянии).

1 Типы и особенности кипящих реакторов

1.1 Признаки классификации кипящих реакторов

Водо-водяные кипящие реактора (ВК) имеют характерное отличие от водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР). Кипение воды, то есть процесс преобразование пароводяной смеси происходит не посредственно в активной зоне реактора. В ВВЭР процесс образование пароводяной смеси получаем в парогенераторе, тем самым имея в ВВЭР двух контурную систему, но в ВК схема генерации пара одноконтурная, и на выходе из АЗ паросодержание смеси составляет 70–75%. Отличие спектра нейтронов, материалов и по конструкции АЗ, в малой степени отличается от АЗ ВВЭР.

Схемы АЭС с кипящими реакторами разнообразны. Например: с кипением теплоносителя только в каналах; прямоточный; с многократной принудительной циркуляцией и сепарацией пара вне реактора; с многократной естественной циркуляцией и получение пара более низкого давления охлаждением котловой воды. Недостатком является то, что АЭС работающие по прямому циклу, имеют высокое излучения в турбине и в технологическом оборудовании.

Число возможных теплоносителей для кипящих реакторов, конечно, меньше, чем для реакторов без кипения, так как не все жидкости, применяемые в качестве однофазных теплоносителей, кипят в интервале температур и давлений, приемлемом для энергетического использования. В остальных отношениях диапазон возможных разновидностей кипящих реакторов шире, чем реакторов без кипения.

Кипящие реакторы могут различаться по следующим признакам.

По роду теплоносителя. Теплоносителями могут быть радиационно устойчивые жидкости, кипящие при технически и энергетически приемлемых температуре и давлении. Это прежде всего вода, обычная или тяжелая, или кипящие при высокой температуре органические

теплоносители, которые, однако, существенно разлагаются под действием радиации и температуры, что сильно ограничивает их применение. В дальнейшем, по мере расширения технических возможностей, можно будет применять и другие среды, вплоть до жидких металлов. Наряду с двухфазными однокомпонентными теплоносителями, каковыми являются смеси жидкости и ее пара, в принципе могут использоваться системы из двух и более химически разных компонентов, например, газ – твердые частицы или газ – пар жидкости. Учитывая большое разнообразие возможных систем подобного рода, не исключено, что некоторые из них при соответствующих специальных условиях будут обладать существенными достоинствами в тех или иных узких областях.

По элементам, несущим давление теплоносителя. Ими могут быть общий корпус или отдельные каналы. Соответствующие корпусные и каналные реакторы широко распространены.

По виду замедлителя. Замедлитель может быть твердым (графит) или жидким. При этом он может быть кипящим (например, в корпусном реакторе) либо однофазным (в реакторе с тяжеловодным замедлителем в общем баке – «каландре» с каналами, содержащими топливо, и кипящий легководный теплоноситель).

По агрегатному состоянию топлива. Реактор может иметь твердые топливные элементы, либо раствор, содержащий топливо, или, наконец, суспензию топлива.

Кроме перечисленных признаков, по которым можно квалифицировать и реакторы без кипения, имеются еще признаки, специфические для реактора с кипением. Эти реакторы можно различать.

По паросодержанию на выходе из активной зоны. В реакторах с многократной циркуляцией за один проход через активную зону испаряется лишь часть воды, и на выходе из активной зоны имеется кроме пара вода. Она возвращается повторно в активную зону по контуру многократной

циркуляции (по котловому контуру). В прямоточных реакторах вся вода за один проход превращается в пар. Самоиспарение при дросселировании позволяет при том же давлении и той же температуре теплоносителя в реакторе производить слаборадиоактивный пар несколько более высокого давления, чем с помощью поверхностных теплообменников-парогенераторов. Но дросселирование требует увеличения мощности перекачивающих насосов первого контура, причем эта мощность быстро растет с увеличением давления производимого пара. Поэтому получение пара дросселированием может быть оправдано лишь при достаточно низком давлении производимого пара.

Способ производства пара в реактора – поверхностным теплообменом или дросселированием – не оказывает на расчет и конструкцию реактора существенного влияния.

По способу получения пара, направляемого в турбину. Пар можно получать только в реакторе. Но можно еще дополнительно получать пар по средством само испарения или охлаждения котловой воды в обособленном парогенераторе подобного тому, как это делается в реакторе без кипения.

Дополнительный пар имеет, конечно, давление более низкое, чем пар, получающийся в реакторе. Такой цикл с использованием пара двух разных давлений (цикл двух давлений) иногда называют двойным циклом.

По типу сепарации – внутри или вне корпуса реактора, гравитационная или принудительная.

По способу осуществления многократной циркуляции – путем конвекции в общем объеме без опускного участка (неорганизованная циркуляция), посредством организованной циркуляции по контуру сподъемным и опускным участками и принудительной циркуляцией механическим насосом или инжектором.

По числу контуров или радиоактивности пара, поступающего в турбину. Возможна двухконтурная установка с кипящим реактором;

вторичный пар, поступающий на турбину в такой установке, не радиоактивен. Возможна и одноконтурная установка с непосредственной подачей слабоактивного пара из реактора в турбину. Наконец, возможна промежуточная, так называемая полутораконтурная установка, в которой насыщенный пар, полученный в промежуточном парогенераторе, перегревается в реакторе, активизируясь при этом слабее, чем в одноконтурной установке.

По перегреву пара. В турбину может подаваться насыщенный пар или пар, перегретый в том же реакторе, где он произведен. Может также подаваться пар, перегретый во внешнем источнике тепла. Реакторы с внутренним ядерным перегревом конструктивно сложнее, а реакторы с внешним перегревом требуют более сложной схемы и системы расхолаживания. И те, и другие позволяют повысить КПД и упростить паротурбинную часть установки.

По конструкции реакторы с кипением отличаются один от другого благодаря указанным выше различиям в замедлителе, в теплоносителе и элементах, несущих его давление, в агрегатном состоянии топлива, в теплотехнической схеме. Наряду с этими возможно большое число вариантов решения других проектно – конструкторских вопросов, таких как тип ТВЭЛов, размещение и конструкция органов СУЗ, режим работы и конструкция системы перегрузки и т.п. В большинстве своем конструкционные особенности не изменяют основных положений расчета, хотя и могут оказать существенное влияние на ряд деталей расчета, а также на надежность и осуществимость установки.

По назначению. Реакторы служат: для производства электроэнергии на АЭС; для производства тепла на атомных станциях теплоснабжение для бытовых нужд (АСТ) или для нужд промышленной технологии (АСПТ); для производства тепла, и электроэнергии на атомных ТЭЦ

Таблица 1 – Характеристики корпусных кипящих реакторов

№ п/п	Параметр	Тепловая мощность, МВт	Удельная мощность, МВт/м ³	Давление, МПа	Вид циркуляции	Скорость теплоносителя на входе в ТВС, м/с	Топливо	Обогащение урана, %	Диаметр твэла, мм	Длина топливного сердечника, см	Водно-урановое отношение	Замедлитель	Материал оболочки	Выгорание топлива, МВт·сут/кг
1	Дрезден 1	626	27	7	Принуд.	2	UO ₂ +Th	1,5	14,4	270	2,1	H ₂ O	Zr	11
2	Дрезден 2	700	33,2	7	Принуд.	2	UO ₂ +Th	1,85	14,1	280	2,3	H ₂ O	Zr	11
3	BWR/6	3560	56	7	Принуд.	2	UO ₂	2,8	12,3	365	2,4	H ₂ O	Zr	28,4
4	КАНЛ	60	16	7	Естест.	1	UO ₂	2,6	-	157	2,7	H ₂ O	Zr	-
5	Humbolt Bay	165	50	7	Естест.	1,4	UO ₂	2,6	-	197	-	H ₂ O	Неп ж	5,7
6	ВК-50 проект	140	27	7...10	Естест.	0,5	UO ₂	2	10,2	200	2,2	H ₂ O	Zr	8
7	ВК-50 1972 г.	220	42	7	Естест.	0,8	UO ₂	3	9,1	200	2,2	H ₂ O	Zr	20
8	ВК-50 2000 г.	200	40	5	Естест.	1,2	UO ₂	3	9,1	200	3,0	H ₂ O	Zr	25
9	ВК-50 переп	200	40	5	Естест.	1,4	UO ₂	-	9,1	200	3,0	H ₂ O	Zr	29

1.2 Корпусной кипящий реактор с многократной циркуляцией теплоносителя

Типичный корпусной реактор с кипящим теплоносителем–замедлителем (типа ВWP или ВВРК) при достаточно большой мощности (более 500 МВт (эл.)) обычно имеет многократную принудительную циркуляцию (МПЦ), хотя при небольших мощностях целесообразна более простая естественная циркуляция (например, ВК-50). Эти реакторы, особенно с МПЦ, распространены за рубежом (США, ФРГ, Япония).

В таких реакторах последних поколений весь контур МПЦ встроен в корпус реактора, разделенный внутри обечайкой – «шахтой» на центральную подъемную и кольцевую опускную части контура циркуляции. Активная зона находится в «корзине» центральной части и состоит из вертикальных параллельных топливных кассет с хвостовиками в отверстиях опорной плиты корзины. Кассета ограничена квадратным или шестигранным тонким циркониевым чехлом с пучком двуокисных твэлов в оболочках циркалоя или сплава циркония с 1 % ниобия. Над пучком твэлов в кассете может быть индивидуальный тяговый участок; далее вверх – общая камера сбора пароводяной смеси из всех кассет и общий блок осевых инерционных сепараторов. Отделенный в нем влажный пар через жалюзийные осушители уходит из корпуса реактора в теплосиловую установку (ТСУ), а отсепарированная вода стекает в межсепараторное пространство, переливается в кольцевой опускной канал между корпусом и шахтой и поступает на всас встроенных в корпус циркуляционных насосов. Насосы обычно имеют регулируемое число оборотов, чтобы можно было воздействовать на паросодержание и через него на реактивность. Насосы с электроприводом встраиваются во многих случаях в корпус под кольцевым опускным каналом; инжекторные насосы располагаются в кольцевом канале,

а насосы с паром турбоприводом (паром, выходящим из реактора) можно располагать над кольцевым каналом [6].

Приводы стержней СУЗ в большинстве реакторов располагаются под днищем корпуса, а сверху активной зоны, над блоком сепараторов, имеется общая съемная крышка корпуса для перегрузки топлива после остановки и расхолаживания реактора.

Технологическая схема такого реактора включает в общем случае один или несколько параллельных контуров многократной циркуляции, составляющих котловой контур. Каждый контур содержит: группы параллельных каналов (кассет) АЗ, имеющих рабочую тепловыделяющую часть и иногда индивидуальные тяговые участки; общий тяговый участок над каналами, при внешней сепарации часть тягового участка лежит в корпусе реактора, часть – в соединительных трубопроводах, ведущих пароводяную смесь реактора к сепаратору; сепаратор внешний или внутренний; опускной участок от сепаратора до уровня входа в активную зону (АЗ и тяговый участок составляют вместе подъемную ветвь контура); в случае принудительной сепарации на опускном участке (обычно после места подвода питательной воды) стоит насос для многократной циркуляции, а в случае предельного двойного цикла (цикла двух давлений пара) с охлаждением в парогенераторе всего потока воды перед насосом стоит еще парогенератор.

К контуру многократной циркуляции присоединяются паросиловой контур; контур парогенератора; система очистки воды, обеспечивающая отбор котловой воды, ее очистку и возврат воды очищенной от примесей; система аварийного охлаждения реактора (САОР), которая при всех авариях в том числе при гипотетической максимальной проектной аварии (МПА), обеспечивает теплоотводы из АЗ на уровне, предотвращающем по крайней мере ее плавление.

В паросиловой контур поступает пар из парового пространства сепаратора, и из него возвращается питательная вода в верхнюю часть опускного участка; в случае двухконтурной схемы к контуру многократной циркуляции присоединяется не паросиловой, а паропреобразовательный контур.

Контур парогенератора имеется в тех случаях, когда используется двойной цикл (цикл двух давлений), и служит для отбора котловой воды в верхней части опускного участка и возврата охлажденной воды несколько ниже места отбора. В случае предельного двойного цикла отбирается вся котловая вода, то есть в опускной участок включается парогенератор.

1.3 Канальный кипящий реактор с многократной циркуляцией теплоносителя

Принципиальная схема контура многократной циркуляции в канальном кипящем реакторе отличается от описанной схемы циркуляции в корпусном кипящем реакторе обычно лишь наличием отдельных для каждой петли охлаждения коллекторов на входе и выходе групп каналов АЗ, то есть отсутствием общих для всей АЗ коллекторов, каковыми служит корпус в корпусном реакторе. Это позволяет уменьшить масштаб максимальной проектной аварии и создает некоторое удобство при ремонтных работах. Зато каждая петля охлаждения должна иметь собственный резервный ГЦН либо нужно сильнее снижать мощность при отключении одного ГЦН. Конструкционная же схема канального реактора существенно отличается от корпусного реактора.

Практически самым важными и представительными среди канальных кипящих реакторов мира являются отечественные реакторы типа РБМК, которые не нуждаются в уникальных корпусах давления, а поэтому базируются на иной промышленной базе, чем реакторы ВВЭР.

Фундаментальные для реакторов можно считать следующие признаки: вертикальные каналы с топливом и теплоносителем, допускающие поканальную перегрузку топлива; топливо в виде пучков цилиндрических ТВЭЛов из двуокиси урана (или другой плотной коррозионностойкой в воде композиции) в циркониевых оболочках; графитовый замедлитель между каналами; легководный кипящий теплоноситель в контуре многократной циркуляции с прямой подачей пара в турбину одноконтурной АЭС.

Эти фундаментальные решения базируются на большом опыте атомной энергетики, а в совокупности они обуславливают все основные особенности реактора и АЭС, как недостатки: большие размеры реактора; разветвленность системы подвода – отвода теплоносителя каждого канала; иногда ограничения, диктуемые необходимостью исключать короткопериодную неустойчивость нейтронного поля из-за большого парового коэффициента реактивности; захват нейтронов стенками каналов; слаборадиоактивный пар в турбине, так и достоинства, в том числе: доступность основных материалов; отсутствие уникальных корпусов и соответствующих ограничений единичной мощности реактора и производственной базы; отсутствие громоздкого и дорогого парогенератора; возможность непрерывной перегрузки топлива и хороший нейтронный баланс; гибкий топливный цикл, легко приспособляемый к изменениям конъюнктуры топливного рынка; гибкий термодинамический цикл, доступность ядерного перегрева; возможности поканального регулирования расхода, контроля целостности каналов, контроля параметров и активности теплоносителя каждого канала и замены на ходу негерметичных ТВС, соответствующая высокая надежность и живучесть реактора; принципиальная возможность достижения высокой безопасности и ее дальнейшего повышения, в частности за счет исключения из контура крупных сосудов и труб, использования питательной воды для аварийного охлаждения и так далее.

Топливная составляющая стоимости 1кВт·ч у этих реакторов немного ниже, чем у водо-водяных, и выше, чем у тяжеловодных, а капитальная составляющая ниже, чем у тяжеловодных, и близка к таковой у АЭС с водо-водяными реакторами.

На смену АЭС с реакторами РБМК-1000 приходит второе поколение с реакторами РБМК-1500, форсированный в 1,5 раза до мощности 1500 МВт, благодаря использованию имеющих в реакторе РБМК-1000 резервов по отношению к максимально допустимым температурам графитовой кладки и других конструктивных узлов и применению ТВС с так называемыми интенсификаторами; последние, закручивая поток в специальных дистанционирующих решетках, способствуют увлажнению поверхности твэлов и выравниванию по сечению пучка энтальпии двухфазного потока с высоким паросодержанием. При этом гидравлическое сопротивление, критическая мощность и паросодержание повышаются в 1,5 раза и более, расход можно даже уменьшить.

Другой возможный путь повышения критической мощности – уменьшение массовых скоростей и длин ТВС с помощью так называемого «многоэтажного» канала с n этажами, расположенными по высоте канала, но включенными параллельно друг другу. Это резко (в n раз и более) сокращает массовые скорости, затягивает срыв и осушение жидкой пленки на твэлах, то есть повышает допустимое паросодержание и мощность, снимает проблему вибраций, резко (в n^2 раз и более) уменьшает гидросопротивление обогреваемой части канала и помимо роста мощности открывает перспективу радикального усовершенствования контура благодаря появлению возможности циркуляции инжекторами, работающими от напора питательных насосов.

Дальнейшее увеличение мощности канала при сохранении максимальной нагрузки ограничено прежде всего теплоотводом из графита. Кроме того, требуется увеличение числа твэлов и соответствующего

увеличения диаметра и шага каналов или уменьшения диаметра твэлов. Последнее ограничено ростом стоимости изготовления (на 1 кг твэлов), уменьшением минимальных зазоров пучке между твэлами и ростом гидросопротивления АЗ.

Разветвленность канальным коммуникаций контура МПЦ и громоздкость общей части контура считается главным недостатком канальных реакторов. Видны пути постепенного ослабления и устранения этих недостатков и использования особенностей канальной структуры для повышения безопасности таких реакторов (кроме упомянутой уже выше перспективы применения встроенных инжекторов для циркуляции).

В корпусных реакторах корпус является естественным коллектором максимально крупных петель охлаждения, «дробление» которых нецелесообразно. В канальном реакторе нет необходимости в объединении всего водяного объема; относительно мелкие, автономные по воде петли охлаждения вполне соответствуют его инженерному облику и в случае разрыва резко уменьшают масштаб аварии.

Одновременно «мелкие» петли позволяют приблизить сепараторы и насосы к реактору, сократить протяженность поканальных коммуникаций и участков, компенсирующих термические удлинения, улучшить условия естественной циркуляции.

В основе этого направления лежит замена крупных насосов большим числом мелких. Наиболее подходящим может оказаться применение встроенных в контур (без вывода вала) турбонасосов с паровым приводом. Эти насосы намного компактнее и легче электронасосов, не имеют вывода вала из полости высокого давления активной горячей воды и обеспечивают примерную пропорциональность числа оборотов и производительности насосов расходу пара из реактора, то есть примерное постоянство недогрева воды на входе, паросодержания на выходе и распределения плотности воды по высоте АЗ.

Это позволяет также сократить эффекты реактивности, обеспечить без помощи больших маховых масс аварийный теплоотвод, уменьшить провалы уровня и потребные запасы воды в сепараторе [1÷6].

2 Описание характеристик и особенностей реактора ВК-50

2.1 Актуальность физических исследований активной зоны реактора ВК-50

Применение ВК-50 на данный момент, помогает решить ряд научных проблем связанные с аргументацией различных отдельных режимов реакторов ВВЭР (АТWS), а так же проектов кипящих реакторов: ВК-50, ВК-300; возможное обоснование применения в будущем, для одноконтурных ВВЭР СКД [13÷15]. Представление задачи являются, приоритетно, российскими проблемными вопросами. Неотъемлемое участие России в мировой экономике приводит к тому, что целесообразно рассмотреть применимость установки и обоснования зарубежных проектов, прежде всего, ВWR с естественной циркуляцией теплоносителя – SBWR [16].

На данный момент корпусные кипящие реактора находятся на одном из основных мест во всем мире, среди различных типов энергетических реакторов, которые используются в ядерных паропроизводящих установках. Это связано с тем, что технологическая схема реактора отличается существенной простотой, а именно одноконтурной системой тем самым быть безопаснее и не иметь трудностей в эксплуатации. Отсюда следует, что оборудование используется на много меньше, а защитная оболочка на много проще и соответственно капитальные затраты намного ниже. Себестоимость установки ВWR меньше, чем на той же установке PWR и это определило реактор на одно из основных мест в мировой энергетике.

Исследования на первых кипящих реакторах, в котором замедлителем и теплоносителем (серии BORAX) является кипящая вода. В США пришли к выводу, что использование и осуществление такой принципиально простой и безопасной эксплуатации реактора с генерацией пара в активной зоне, позволит уменьшить затраты и упростить эксплуатацию установки [17].

Так же США занималась исследованиями нейтронно-физических свойств, а также решались теплогидравлические вопросы, связанные с данным типом установки.

Можно выделить конкретные направления, по которым развивались корпусные кипящие реактора:

- При уменьшение диаметра твэлов, повышается теплехимическая надежность АЗ и способствует увеличению энергонапряженности;
- Повышение единичной мощности, а так же и размеров АЗ реактора, способствует снижению удельных капитальных затрат;
- Для подавления избыточной реактивности и выравнивания энерговыделения используются выгорающий поглотитель. Увеличения обогащения топлива и использование твэгов, а именно уран-гадолиниевых топливных композиций, значительно повышает длительность кампании;
- Повысить выгорание топлива возможно, при увеличении водо-топливного отношения (ВТО);
- Повышение теплотехнической надежности АЗ, а так же ее энергонапряженность, возможно при увеличении скорости теплоносителя, а именно увеличить гидравлические характеристики ТВС.

Активная зона типичного корпусного кипящего реактора представляет собой набор ТВС, главным образом, квадратного сечения, между которыми снизу вводятся крестообразные поглотители с наполнителем из карбида бора. Одновременно теплоносителем и замедлителем в большинстве случаев является обычная вода. В реакторах с принудительной циркуляцией, которые в настоящее время получили преимущественное развитие, скорость теплоносителя на входе в активную зону составляет ≤ 2 м/с.

В реакторах с естественной циркуляцией скорость теплоносителя на входе в активную зону находится в пределах 0,5...1,2 м/с. Корпусные

кипящие реакторы с естественной циркуляцией создавались в США (EBWR, Elk River, Humbolt Boy), в ФРГ (Kahl). В настоящее время только один из этой серии реакторов (с естественной циркуляцией теплоносителя) - реактор ВК-50 находится в эксплуатации. Все они имеют сравнительно низкую мощность (в пределах 200 МВт), однако вследствие относительно несложной конструкции и простоты эксплуатации могут быть использованы в качестве источников энергии для отдаленных и труднодоступных районов.

Недостатком реакторов типа ВWR является меньшее выгорание топлива, чем в реакторах РWR. Поэтому крайне важна разработка технических решений по повышению выгорания топлива.

Для обеспечения требований безопасности и достижения наилучшего использования топлива при конструировании ТВС активной зоны легководного энергетического реактора применяются выгорающие поглотители. Это позволяет повысить обогащение топлива и скомпенсировать излишне высокий запас реактивности в начале кампании. Первоначально в течение долгого времени применялись борсодержащие выгорающие поглотители. Основные недостатки такого поглотителя как самостоятельного конструктивного элемента состоят в том, что он занимает полезное место в ТВС, так как устанавливается вместо твэла, увеличивая тем самым максимальную линейную мощность, а также в недостаточно высокой скорости выгорания ^{10}B . Этот факт не обеспечивает одно из основных требований - выгорание поглотителя в течение одной кампании реактора [18÷20]. В связи с этим фирма «Вестингауз» разработала технологию нанесения тонкого слоя борсодержащего поглотителя на топливную таблетку [21÷22]. Наряду с совершенствованием поглотителя на основе ^{10}B изучалось применение и других выгорающих поглотителей.

В настоящее время наиболее перспективным среди известных выгорающих поглотителей нейтронов является гадолиний. Впервые гадолиний стал применяться кампанией «Дженерал электрик» в реакторах

типа BWR [23÷24] Успешный опыт по применению топлива реактора BWR в виде спеченной смеси Gd_2O_3 с UO_2 в таблетках инициировал исследования по использованию гадолиния в топливном цикле PWR [25÷26].

Для реакторов BWR фирма «Эдванс ньюклар фьюэлс» разработала ТВС 9×9 с уменьшенной радиальной неравномерностью энерговыделения за счет установки на периферии ТВС твэлов большего диаметра (11 мм), а в средней части – твэлов меньшего диаметра (10,6 мм), и размещения пяти водяных стержней в центре ТВС (таблица 2).

Эти меры позволяют достичь проектной глубины выгорания с меньшим обогащением топлива. Данная конструкция способствует повышению маневренности реактора из-за снижения вероятности быстрого выхода газообразных продуктов деления. Сокращаются затраты на топливо – по сравнению с ТВС 8×8 возможная экономия составляет 70 долларов на 1 кг урана. В 1988 г. фирма поставила полную загрузку из ТВС 9×9 для реактора BWR. В настоящее время разрабатывают усовершенствованную конструкцию ТВС 9×9-IX (диаметр твэла 11 мм) с повышенным до 2,7 водно-урановым отношением (из центра ТВС удалены 9 твэлов). Такие ТВС сочетают преимущества ТВС 9×9 со стойкостью к взаимодействию топлива с оболочкой, присущей конструкциям с циркониевым подслоем. Сборка 9×9-IX предназначена для длительных циклов облучения (18...24 месяцев) и большой глубины выгорания (40...45 МВт·сут/кг) [27÷28]. Таким образом, накоплен положительный опыт применения выгорающих поглотителей и имеются технические решения по улучшению использования топлива BWR. Этот опыт целесообразно применить при совершенствовании активной зоны ВК-50 и в проектах ВК-300, ВК-501 и др.

Итак, водоохлаждаемые реакторы в ближайшие 30 лет будут занимать одно из основных мест в ядерной энергетике. Среди эволюционных проектов такого типа реакторов имеются проекты с естественной циркуляцией кипящего теплоносителя, такие как SBWR, ВК-300, ВК-50Т. Среди

инновационных проектов наиболее близкий к реактору ВК-50 по конструктивному исполнению и изменению плотности теплоносителя проекты ВВЭР СКД-И и ВВЭР СКД (одноконтурный, прямоточный). Поэтому при проектировании активных зон указанных реакторов полезен опыт эксплуатации и последовательного совершенствования активной зоны реактора ВК-50.

Таблица 2 Сравнительные характеристики различных типов ТВС в современных реакторах ВВЭР/6

Характеристика	8×8 с двумя водяными полостями	9×9 с пятью водяными полостями	9×9-IX с отдельным каналом вместо девяти ТВЭЛОВ
Удельная энергонапряженность активной зоны, кВт/л	40...51	40...51	До 57
Диаметр ТВЭЛА, мм	12,3	11/10,6	11
Внутренняя среда ТВЭЛА	Гелий под давлением		
Среднее обогащение по ²³⁵ U, %	3,3...3,5	3,4...3,6	3,5...4,0
Средняя глубина выгорания, МВт·сут/кг	34	38	40...45
Число ТВЭЛОВ	62	76	72
Число водяных полостей вместо ТВЭЛОВ	2	5	Канал, замещающий 9 ТВЭЛОВ
Водно-топливное отношение	2,4	2,5	2,7
Относительные затарты на топливо	1,00	0,96	0,92...0,95
Экономия по сравнению с ТВС 8×8, дол./кг		70	90...140

В настоящее время этот реактор применяется для решения как научно-исследовательских задач в обоснование принимаемых проектных решений по вышеуказанным установкам, так и для решения экономических вопросов – снабжение электроэнергией и теплом. Поэтому экономичная и эффективная работа реактора важна для ГНЦ РФ НИИАР (тепло и электроэнергия) и для ядерной отрасли (решение задач по программе эволюционных и инновационных проектов).

2.2 Конструктивные особенности активной зоны реактора ВК-50

Активная зона реактора ВК-50 (рисунок 1) размещается в нижней части реактора в выемной корзине. Она состоит из 72-х рабочих тепловыделяющих сборок (ТВС), 16 рабочих органов с ручным регулированием (РО РР) и 3-х рабочих органов быстрого действия аварийной защиты (РО АЗ). Схемы реактора и активной зоны приведены на рис.1. Рабочие ТВС дистанционируются в шестигранной решетке с шагом 185мм. Органы СУЗ (РО РР и РО АЗ) подвешены на штангах механизмов СУЗ и могут перемещаться с их помощью относительно рабочих ТВС.

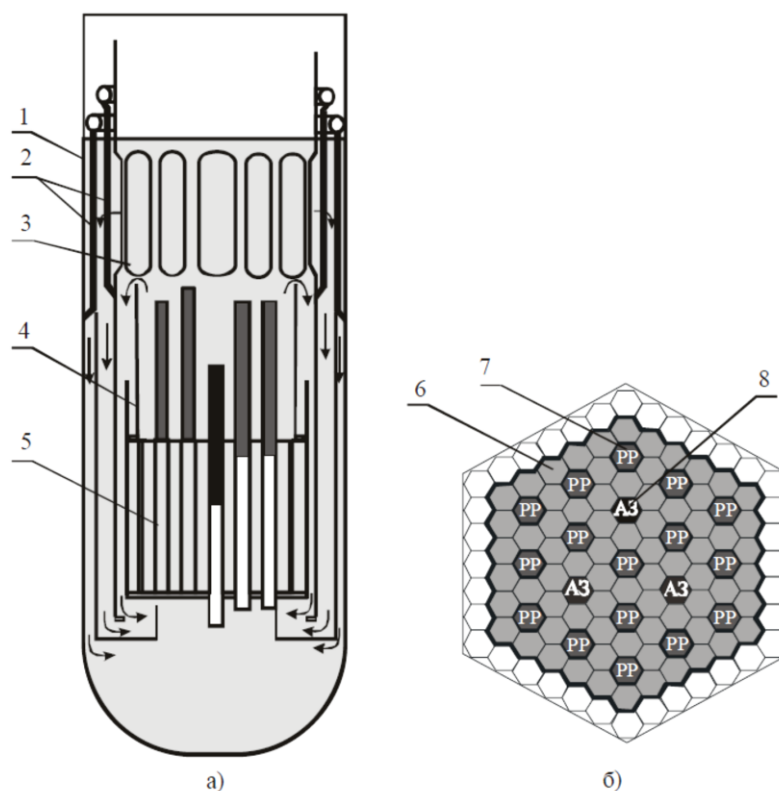


Рисунок 1 – Реактор ВК-50. Корпус реактора (а), активная зона (б):

1 – корпус; 2 – патрубки подачи питательной воды; 3 – переливные окна; 4 – тяговый участок; 5 – активная зона; 6 – тепловыделяющая сборка; 7 – кассета с ручным регулированием (РО РР); 8 – кассета аварийной защиты (РО АЗ)

Теплоноситель в активную зону поступает снизу по горячему (в периферийные ТВС без недогрева) и холодному (в центральные ТВС с недогревом 4...5°C) опускающимся участкам. В процессе прохождения через твэльный пучок вода закипает и ее плотность на выходе может уменьшиться до $\sim 0,3 \text{ г/см}^3$.

2.3 Описание ТВС реактора

В настоящее время в реакторе используются ТВС с водно-топливным отношением ВТО=3,0, с обогащением топлива 3% по урану-235, со съёмным хвостовиком.

ТВС реактора состоит из тепловыделяющего пучка элементов, шестигранного чехла и концевых элементов – головки и хвостовика, рисунок 2.

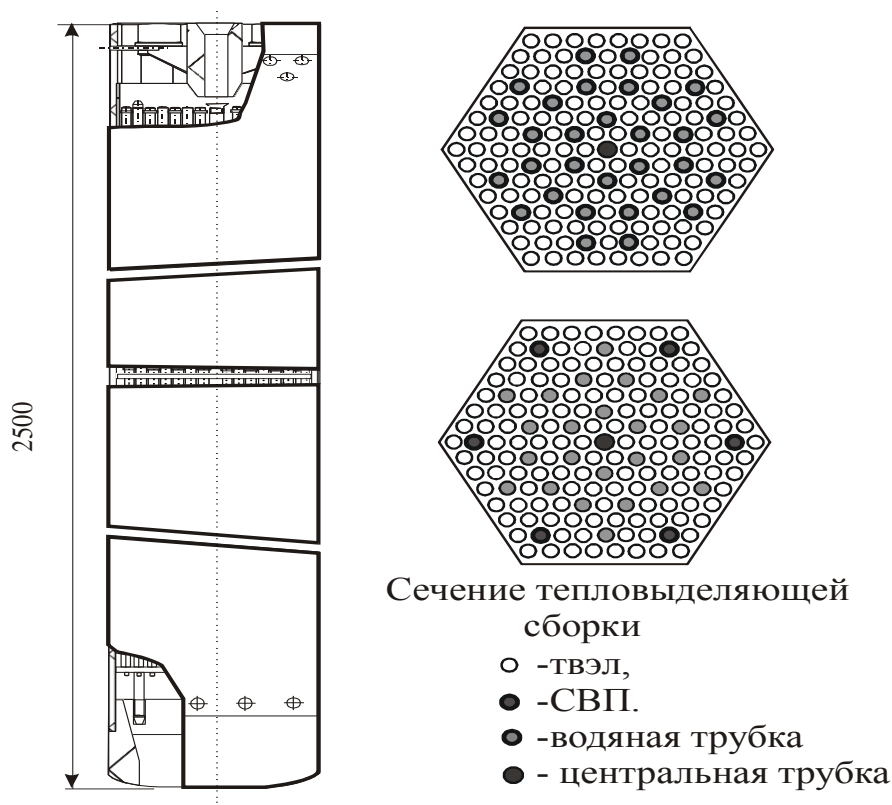


Рисунок 2 – Тепловыделяющая сборка

Чехол с внешним размером «под ключ» 176 мм и толщиной 1,5 мм выполнен из сплава циркония с 2,5% ниобия (сплав Э-125 или Э-125Б).

Тепловыделяющий пучок ТВС содержит 168 элементов, в том числе 138 ТВЭЛов и 30 трубок-вытеснителей (вместо ТВЭЛов). Трубки – полые, заглушены снизу и открыты сверху, их длина 800 мм. Такая конструкция трубок- вытеснителей уменьшает гидравлическое сопротивление ТВС

Хвостовик и головка ТВС предназначены для подвода и отвода теплоносителя и имеют приспособления для производства транспортных операций. Головка, хвостовик и дистанционирующие решетки ТВС изготавливаются из нержавеющей стали X18H10T.

В настоящее время в составе РО РР используются ТВС универсального исполнения. Они могут эксплуатироваться как в рабочих ячейках активной зоны, так и в ячейках СУЗ в составе РО РР. Высота топливного столба в них такая же, как и в рабочих ТВС, то есть 1980 ± 10 мм. Основные характеристики ТВС приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики ТВС

Параметр	Значение
Чехол: Материал	Сплав Э125(Zr+2,5%Nb) или Э125 Б)
размер «под ключ», мм	176
толщина, мм	1,5
содержание бора ест.в материале чехла, вес.%	0,0 или 0,07÷0,1
Центральная трубка: Материал	сплав Э110(Zr+1%Nb)
Наружный диаметр, мм	10,3
Толщина, мм	0,8
Дистанционирующие решетки: количество, шт	6
Материал	X18H10T
Шаг между решетками, мм	415
Высота решетки, мм	10

Продолжение таблицы 3

Твэлы: количество, шт Высота топливной части в твэле, мм Шаг расположения твэлов по треугольной решетке, мм материал сердечника твэла обогащение по урану- 235,% внешний диаметр оболочки твэла, мм толщина оболочки твэла, мм материальный состав оболочки твэла	138 1980±10 13,0 двуокись урана до 3,0 9,1 0,65 сплав Э110 (Zr+1%Nb)
Полые трубки - вытеснители: количество, шт Материал трубки Диаметр, мм Толщина, мм Высота, мм	30 сплав Э110 (Zr+1%Nb) 9,1 0,65 800
Дистанционирующие решетки: количество, шт Материал Шаг между решетками, мм Высота решетки, мм	6 X18H10T 415 10

2.4 Описание рабочего органа ручного регулирования

Рабочий орган ручного регулирования состоит из верхней поглощающей и нижней топливной частей. Внешний вид РО РР изображен на рисунке 3, а основные ее материальные и геометрические характеристики приведены в таблице 4. Топливная часть такая же, как и у рабочей ТВС, она описана выше.

Таблица 4 – Конструкционные характеристики РО РР

Параметр	Значение
Поглощающая часть РО РР:	
высота, мм	1720
размер «под ключ», мм	169
толщина, мм	7

Продолжение таблицы 4

Топливная часть РО РР:	
Высота топливной части, мм:	
- со съёмным хвостовиком	1980±10
- с закрепленным хвостовиком	1760±10
размер «под ключ», мм	176
Скорость перемещения РО РР при управлении реактором, мм/с	~5,0
Скорость перемещения РО РР при срабатывании аварийной защиты, мм/с	88±3

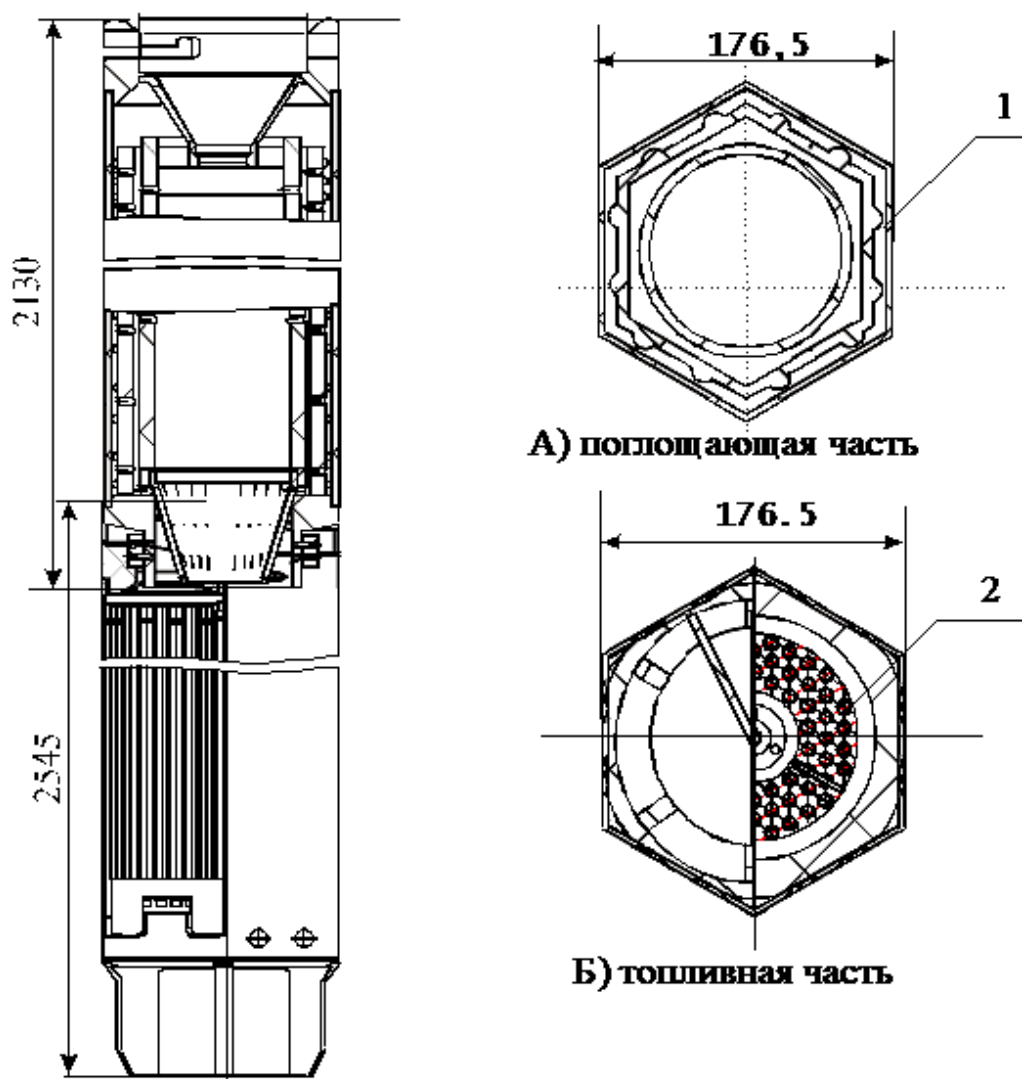


Рисунок 3 – Рабочий орган СУЗ реактора ВК-50:

1 – поглотитель; 2 – ТВЭЛ

Отличительной особенностью хвостовика топливной части РО РР является наличие демпфера для торможения РО РР при его движении вниз во время срабатывания аварийной защиты.

Нижний хвостовик может изготавливаться в несъемном и съемном исполнениях.

Съемное исполнение хвостовика необходимо для универсального использования топливной части РО РР. Заменяв съемный хвостовик топливной части РО РР на хвостовик рабочей ТВС, топливную часть можно устанавливать в рабочую ячейку активной зоны и использовать как обычную рабочую ТВС и наоборот. Длина активной части для топливной части РО РР со съемным хвостовиком равна 1980 ± 10 мм, с несъемным – 1760 ± 5 мм.

Поглощающая часть РО РР выполнена по типу «нейтронная ловушка» и представляет собой шестигранную трубу из борированной стали (сплав СБЯ), которая очехлована с обеих сторон нержавеющей сталью Х18Н10Т (содержание в сплаве СБЯ естественного бора $\sim 1,7\%$). Длина поглощающей части «нейтронной ловушки» равна 1720 мм.

Скорость перемещения РО РР в режиме компенсации реактивности составляет ~ 5 мм/с, в режиме аварийного останова реактора 88 ± 3 мм/с. В случае обесточивания исполнительных механизмов СУЗ скорость перемещения вниз РР составляет 88 ± 7 мм/с.

2.5 Описание рабочего органа аварийной защиты

Основные характеристики РО АЗ приведены в таблице 5.

Рабочий орган аварийной защиты состоит из двух жестко соединенных между собой цилиндрических частей, рисунок 4. Верхняя часть поглощающая, а нижняя часть рассеивающая.

Таблица 5 – Характеристики РО АЗ

Параметры	Значения
Общая длина РО АЗ, мм	4555±2
Длина поглощающей части, мм	1720
Внешний диаметр поглощающей части, мм	145
Толщина поглощающей части, мм	6
Материал поглощающей части	Сталь с естественным бором 1,7%
Внешний диаметр чехла, мм	152х3
Материал чехла	сталь Х18Н10Т
Внутренний диаметр защитной трубы, мм	119х3
Материал защитной трубы	сталь Х18Н10Т
Длина рассеивающей части, мм	1850
Внешний диаметр рассеивающей части, мм	152
Материал рассеивающей части	Сплав Э125 (Zr+2,5%Nb)

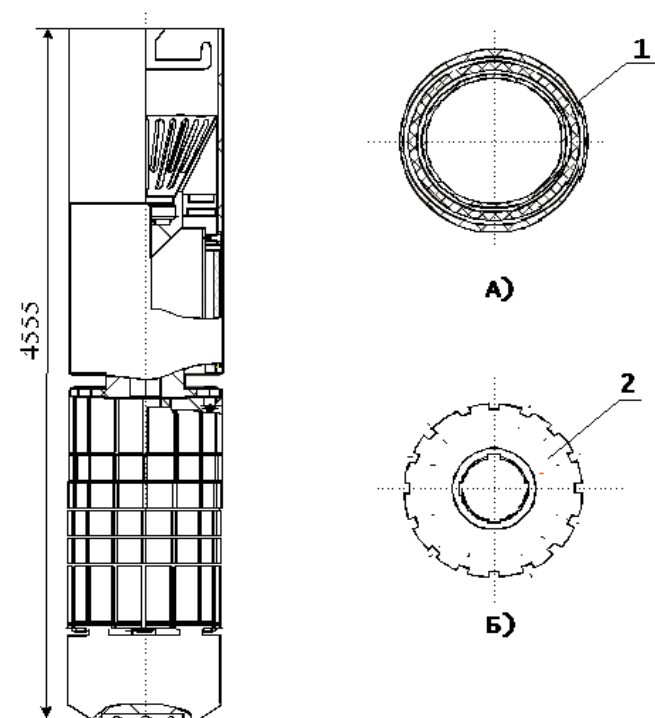


Рисунок 4 – Аварийный орган СУЗ реактора ВК-50:

1 – поглотитель (сплав СБЯ); 2 – рассеиватель (Zr)

Перед выходом в критическое состояние быстродействующие РО АЗ взводятся в первую очередь. При плановом останове реактора или при срабатывании аварийной защиты органы АЗ падают вниз под собственным весом и вместо рассеивателя в активную зону вводится поглотитель. Время свободного падения АЗ равно $1 \pm 0,2$ с.

После подъема РО АЗ практически вся ячейка реактора, предназначенная для ее размещения, занята циркониевым рассеивателем (за исключением небольших кольцевых зазоров между трубой и кассетой, занятых теплоносителем для охлаждения конструкции). Подобная конструкция РО АЗ позволяет исключить всплески нейтронов и уменьшить неравномерность энерговыделения по поперечному сечению ТВС.

2.6 Описание твэла

В качестве топлива в твэлах реактора ВК-50 используется двуокись урана. Из двуокиси урана путем прессования изготавливается цилиндрическая таблетка с плотностью $\sim 10,4$ г/см³. Внешний диаметр таблетки 7,58 мм; высота таблетки ~ 10 мм. В центре таблетки имеется отверстие диаметром $\sim 1,4$ мм.

Конструкция твэла активной зоны реактора ВК-50 представлена на рисунке 5, а его основные конструктивные характеристики в таблице 6.

Таблица 6 – Конструктивные характеристики твэл

Параметр	Значение
Длина твэла, мм	2078,6 \pm 3,3
Внешний диаметр твэла, мм	9,1
Толщина оболочки твэла, мм	0,65
Материальный состав оболочки твэла	сплав Э110 (Zr+1%Nb)
Плотность материала оболочки, г/см ³	6,515

Продолжение таблицы 6.

Масса твэла, кг: для рабочей ТВС; - для топливной части РР	1,15 1,05
Внешний диаметр топливного сердечника, мм	7,58
Высота топливной таблетки, мм	10
Высота топливного сердечника, мм: - для рабочей и универсальной ТВС ; - для топливной части РР	1980 1760
Материальный состав топливного сердечника	Двуокись урана
Плотность UO ₂ в сердечнике, г/см ³	10,4
Масса топливного сердечника, г: - для рабочей и универсальной ТВС; - для топливной части РР	895 790
Параметр	Значение
Обогащение по U-235, %	2,0; 2,4; 3,0
Диаметр центрального отверстия в топливном сердечнике, мм	1,4
Газ, заполняющий зазоры (пустоты) в твэле	He
Давление газа, заполняющего зазоры (пустоты) в твэле, атм	5-7

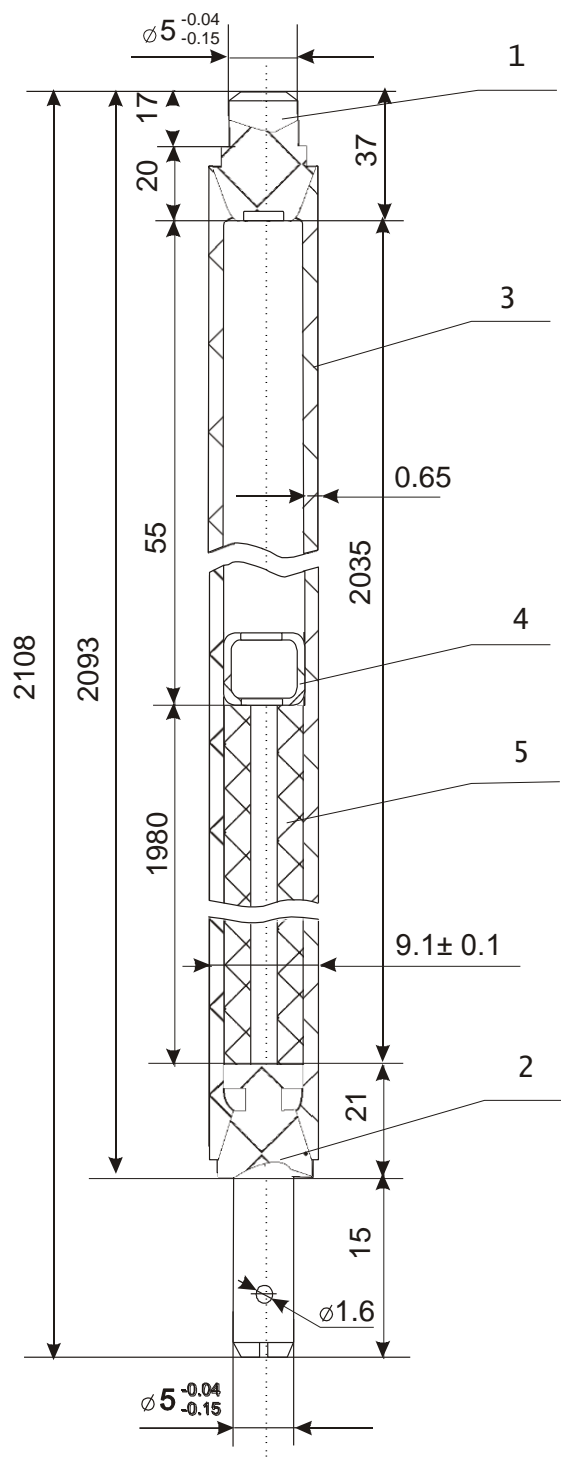


Рисунок 5 –ТВЭЛ ТВС типа ОК-2.4ХС:

- 1 – наконечник верхний; 2 – наконечник нижний; 3 – оболочка; 4 – фиксатор;
5 – топливная таблетка

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований [35÷36].

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д. [37].

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

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;

– оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;

– определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В данной диссертационной работе проведен расчет влияния бора по объему активной зоны, а также сформирована математическая модель неравномерностей для реактора ВК-50. Расчеты проводились с помощью программного комплекса MSU.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования являются неопределенность в исходных данных, определяемых характеристиками ТВЭЛов и ТВС со «свежим» топливом. Одна заводская неравномерность распределения бора по объему ТВЭЛов ТВС, в расчетах реактора ВК-50 необходимо более детально описывать распределение ^{10}B по высоте и по азимуту ТВС, создание математической модели ВК-50.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные научные отрасли.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данных расчетов. Результаты сегментирования представлены на рисунке 10.

		Выравнивание энерговыделения в кипящих реакторах	
		Атомная промышленность	Научная отрасль
Потребность	Сильная		
	Слабая		

Рисунок 10 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию проведенных расчетов

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценивать сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Для анализа конкурентных технических решений стоит рассмотреть методы расчета нуклидного состава с помощью специальных расчетных программ, а именно построение математической модели на базе кодов MCU.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 7. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _{к1}	Б _{к2}	К _{к1}	К _{к2}
1. Экспрессность	0,10	5	5	0,50	0,50
2. Точность	0,10	5	4	0,50	0,40
3. Количество определяемых параметров	0,08	5	4	0,4	0,32
4. Использование ПО для анализа	0,07	5	4	0,35	0,28
5. Простота эксплуатации	0,10	5	5	0,50	0,50
6. Использование БД	0,07	5	4	0,35	0,28
7. Возможность идентификации и расчета активности	0,10	5	4	0,50	0,40
8. Наличие ресурсов памяти	0,07	5	4	0,35	0,28
9. Визуализация результатов	0,07	5	4	0,35	0,28
10. Многофункциональность	0,10	5	4	0,50	0,40
11. Ремонтопригодность	0,06	4	4	0,24	0,24
12. Компактность и коммуникабельность	0,08	4	4	0,32	0,32
Итого	1	58	50	4,86	4,2

На основании представленного выше анализа можно сделать вывод, что использованный в данной магистерской диссертации математическая модель метод на базе кодов MCU является наиболее оптимальным для использования в практических целях. Конкурентные методы определения состава с помощью пакетов программ является экономическим невыгодным и не может учитывать всех факторов таких как погрешность расчета и актуальность баз данных по реактору ВК-50.

4.1.2 SWOT-анализ

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

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

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

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

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

В таблице 8 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	+	+	+	+
B2	+	+	+	+	+
B3	+	–	+	–	+
B4	+	+	+	+	+
B5	+	+	+	+	+

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

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 9.

Таблица 9 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>C1. Научная новизна.</p> <p>C2. Современная технология.</p> <p>C3. Возможность контроля процесса расчета.</p> <p>C4. Наличие актуальных данных по неравномерному энерговыделению в BWR</p> <p>C5. Построение математической модели неравномерности для кипящих реакторов.</p> <p>C6. Исследования выгорания бора в реакторе типа ВК-50</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Наличие человеческого фактора.</p> <p>Сл2. Возможность появления погрешности расчета.</p> <p>Сл3. Продолжительное время расчетов.</p> <p>Сл4. Высокий уровень знаний для выполнения расчетов.</p> <p>Сл5. Появление более точных программ.</p>
<p>Возможности:</p> <p>B1. Использование расчетов для атомной промышленности и научной отрасли.</p> <p>B2. Возможность расчета различного топлива.</p> <p>B3. Актуальность темы для публикации в научных журналах.</p> <p>B4. Выравнивание энерговыделения в кипящих реакторах.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>1. Научная новизна, и, как следствие, публикации в цитируемых научных журналах.</p> <p>2. Анализ влияния неопределённости в исходных данных на разброс результатов расчёта.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Возникновение ошибок из-за длительных расчетов;</p> <p>2. Требование наличия обширных знаний по расчётам в спец. программах.</p>

Продолжение таблицы 9.

<p>Угрозы: У1. Недостаточная точность расчетов. У2. Низкий спрос на результаты при отсутствии публикаций. У3. Отсутствие источников для проверки полученных результатов. У4. Вывод из эксплуатации реактора ВК-50 У5. Появление совершенных технологий в атомной отрасли.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: 1. Несмотря на то, что реакторостроение развивается в сторону ВВЭР, реакторы типа ВWR еще долго будут оказывать влияние на атомную отрасль, выравнивание энерговыделения остается насущной необходимостью, для равномерного выгорания топлива. 2. Несмотря на возможные неточности расчётов, они являются необходимыми для принятия решения проблем энерговыделения в кипящих реакторах.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: 1. Наиболее уязвимые места – высокие требования к знаниям инженера для расчётов, уменьшение погрешности расчётов зависит от баз данных, заполнение которых не зависит от инженера.</p>
--	--	--

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества расчетной модели реактора ВК-50 значительно преобладают над её недостатками. Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

4.2 Планирование управления научно-техническим проектом

4.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР), представленная на рисунке 11, представляет детализацию укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.

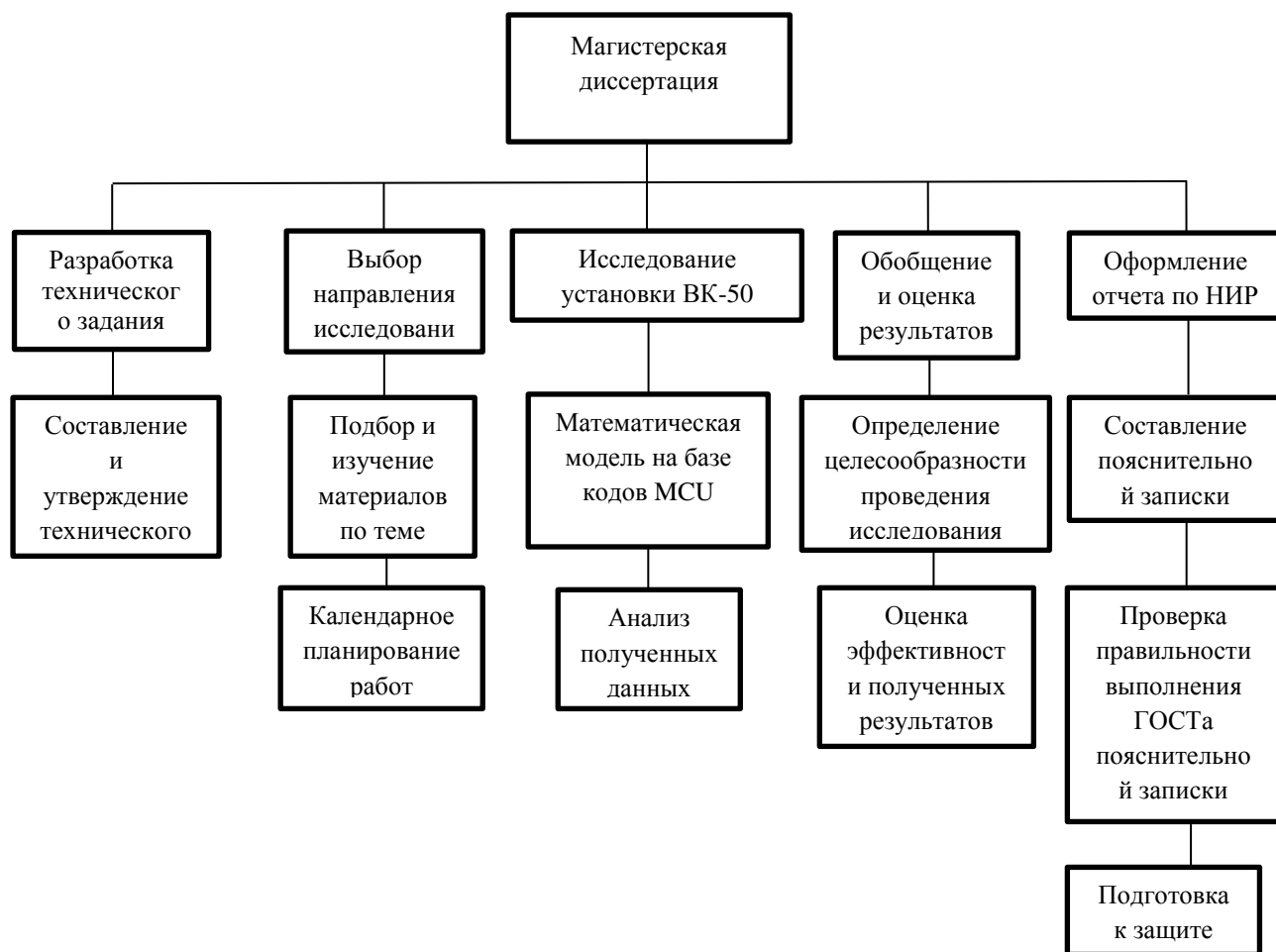


Рисунок 11– Иерархическая структура работ

4.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2017	Приказ по ФТИ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2017	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2017	

Продолжение таблицы 10.

4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2017	Отчёт
5	Календарное планирование работ	12.02.2017	План работ
6	Сбор материала по теме диссертации	13.02.2017	Отчёт
7	Влияние гидравлических характеристик на энерговыделение	14.02.2017	Отчёт
8	Расчетная математическая модель на базе кодов MCU	15.02.2017-30.03.2017	Отчёт
9	Анализ полученных данных	28.03.2017	Отчёт
10	Обобщение и оценка результатов	30.03.2017	Отчёт
11	Составление пояснительной записки	14.02.2017-25.04.2017	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2017	
13	Подготовка к защите	27.04.2017-25.05.2017	

4.2.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ.

Таблице 11 представлен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 11 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ п/п	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Выбор направления исследования	Руководитель	1														
2	Составление технического задания	Руководитель	2														
3	Изучение литературы	Студент	28														

Продолжение таблицы 11.

4	Обсуждение изученных методов расчета и выбор метода расчета в исследовании	Руководитель, студент	2																
5	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	2																
6	Особенности конструкции и работы реактора ВК-50	Студент	28																
7	Расчетный анализ влияния бора (на базе кодов MCU) на параметры реактора ВК-50	Студент	8																
8	Анализ влияния неопределённостей в исходных данных на разброс результатов расчёта	Руководитель, студент	1/9																
9	Оформление реферата, пояснительной записки	Студент	28																
10	Подготовка в защите проекта		5																

■ – студент

▨ – руководитель

4.3 Бюджет научного исследования

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

выполнением [38]. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

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

4.3.1 Расчёт материальных затрат

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3-5 % от цены).

В материальные затраты, помимо вышеуказанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в научной организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Затраты на освещение вычисляются следующим образом:

$$Z_{осв} = \frac{(15 \cdot S_f \cdot M \cdot t)}{1000} \cdot C, \quad (2)$$

где S_f – площадь пола (45 м²);

M – количество часов искусственного освещения в сутки (7 ч);

t – число рабочих дней (38);

C – стоимость 1 кВт/ч электроэнергии (5,8 руб).

$$Z_{осв} = \frac{(15 \cdot 45 \cdot 7 \cdot 38)}{1000} \cdot 5,8 = 1\,041,39 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = \Pi_{эл} \cdot P \cdot T_{об}, \quad (3)$$

где $\Pi_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб за 1кВт/ч);

P – мощность оборудования кВт;

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

В данной работе использовался портативный компьютер с мощностью 400 Вт. В среднем в сутки работа на компьютере и спектрометре составляла 6 часов. В период проведения настройки программы, проведения измерений и анализа было затрачено примерно 230 часов. Тогда затраты на электроэнергию за время выполнения проекта составляют:

$$C_{элект} = (5,8 \cdot 0,4 \cdot 230) + (5,8 \cdot 0,2 \cdot 230) + (5,8 \cdot 0,37 \cdot 230) = 1\,293,98 \text{ руб.}$$

Материальные затраты, необходимые для данной работы, были занесены в таблицу 12.

Таблица 12 – Материальные затраты исследования

Наименование	Количество, шт	Цена за ед., руб	Затраты на материалы, руб
Шариковая ручка	1	35	35
Пачка бумажных листов формата А4	1	250	250
Карандаш грифельный	1	20	20

Продолжение таблицы 12.

Ластик	1	15	15
Картриджи для принтера	1	500	500
ИТОГО			820

С учетом затрат на электроэнергию материальные затраты составили:

$$1\ 041,39 + 1\ 293,98 = 2\ 335,37 \text{ руб.}$$

4.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (5)$$

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

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, рабочих дней (таблица 11);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (6)$$

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

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней (таблица 13).

Таблица 13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество рабочих дней:	299	299
Потери рабочего времени:		
– отпуск	56	48
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (7)$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб;

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

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{б, руб}$	k_p	$Z_{м, руб}$	$Z_{дн, руб}$	$T_{раб, раб. дн.}$	$Z_{осн, руб}$
Руководитель	19 600	1,3	25 480	1 090,50	6	6 543
Студент	1 750	1,3	2 275	94,3	111	10 467

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

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

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

- иные выплаты; районный коэффициент.

4.3.3 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15 % от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн}, \quad (8)$$

где $Z_{дон}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы;

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

Примем коэффициент дополнительной заработной платы для научного руководителя равным 12 %. Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Заработная плата	Руководитель	Студент
Основная зарплата	6 543	10 467
Дополнительная зарплата	982	0
Зарплата исполнителя	7 525	10 467
Итого по статье $C_{зп}$	17 992	

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (9)$$

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$C_{внеб} = 0,3 \cdot (6543 + 982) = 2257,5 \text{ руб.}$$

4.3.5 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и другого оборудования.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (10)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в составляют 12-16 % от суммы основной и дополнительной заработной платы работников, участвующих в выполнении темы.

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

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 16.

Таблица 16 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

№ п/п	Наименование статьи	Сумма, руб
1	Материальные затраты	2 335,37
2	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	17 010,00
3	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	982,00
4	Отчисления на социальные нужды	2 257,50
	Накладные расходы	2 879,72
Итого		25463,87

4.4 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

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

Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 12.

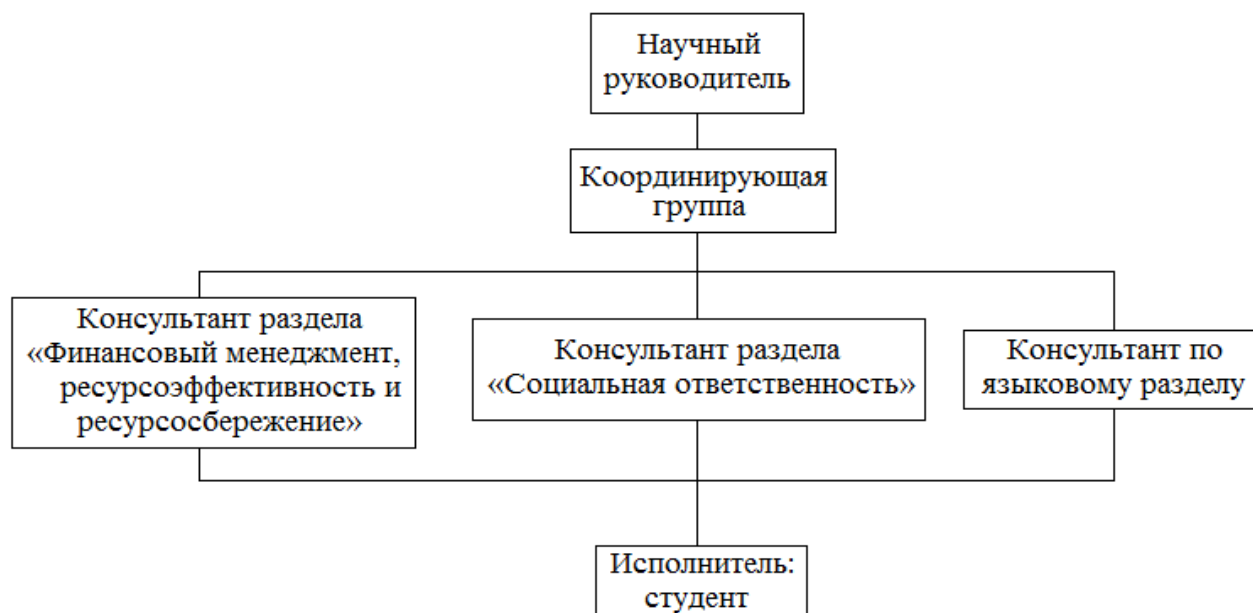


Рисунок 12 – Организационная структура научного проекта

4.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 17.

Таблица 17– Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответственность»	Консультант по языковому разделу	Студент
Разработка технического задания	О				
Составление и утверждение технического задания	О				
Выбор направления исследований	О				И
Подбор и изучение материалов по теме	С				И
Календарное планирование работ	О				И
Обзор научной литературы, а также статей по теме диссертации					И
Влияние гидравлических характеристик на энерговыделение					И
Расчетная математическая модель на базе кодов MCU	О				И
Анализ полученных данных	О				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;
- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);
- согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

4.6 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности [37].

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (таблица 16). 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:
финансовый показатель разработки определяется:

$$I_{фин_i} = \frac{\Phi_{P_i}}{\Phi_{max}}, \quad (11)$$

где $I_{фин_i}$ – интегральный финансовый показатель;

Φ_{p_i} – стоимость i -го варианта исполнения разработки;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

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

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^a, \quad (12)$$

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^p, \quad (13)$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 18 ниже.

Таблица 18 – Оценка характеристик исполнения проекта

№ п/п	Критерии	Весовой коэф-т параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1	Возможность идентификации и расчета активности	0,25	5	4	4
2	Простота эксплуатации	0,15	5	4	3
3	Количество определяемых параметров	0,15	4	4	4

Продолжение таблицы 18.

4	Экспрессность	0,20	4	3	3
5	Многофункциональность	0,1	5	4	4
6	Точность	0,15	5	4	3
ИТОГО		1			

$$I_{\text{тп}} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 = 4,65$$

$$\text{Аналог 1} = 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 = 3,8$$

$$\text{Аналог 2} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 = 3,5$$

Стоимость исполнения аналога 1 – 36 584 рублей, аналога 2 – 30 764 рублей.

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{\text{финр}}^p$) и аналога ($I_{\text{финр}}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p}, \quad (14)$$

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\text{ф}}^a}. \quad (15)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта (таблица 19):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a}, \quad (16)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта.

Результаты вычисления интегральных показателей представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,85	0,77	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,8	3,5	4,65
3	Интегральный показатель эффективности	4,47	4,50	4,65
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,04	1,03	1

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности, т.о. проведенный анализ указывает на превосходство выполненной разработки над имеющимися аналогами.