

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-энергетических установок

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование термической стабильности микротвэлов

УДК 621.039.517.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Кривошеев Владимир Олегович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ ФТИ	Колпаков Г.Н.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2016 г.

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 радиозоологии, 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: (специальность): 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра: Физико-энергетических установок

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. Кафедрой

_____ Долматов О.Ю.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Кривошеев Владимир Олегович

Тема работы:

Исследование термической стабильности микротвэла	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	1618/с от 26.02.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	17.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	– Конструкция микротвэла – Экспериментальные данные по измерению теплопроводности – Справочные данные и литература
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	введение: цель работы, область применения и значимость рассматриваемой проблемы; основная часть: на основании прямых измерений теплопроводности и температуропроводности диоксида урана, выполненных ранее, оценить влияние форморазмеров топливного сердечника на выход ГПД и целостность микротвэла в условиях эксплуатации, также провести анализ конструкции микротвэла, его изготовления, рассмотрение диоксида урана и его свойств в качестве топливного ядра микротвэла
Перечень графического материала	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М.В.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Иностранный язык	Плеханова М.В.
HTR-Brennelement	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	5.02.2016
---	-----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ФЭУ ФТИ	Колпаков Г.Н.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4Г	Кривошеев Владимир Олегович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4Г	Кривошеев Владимир Олегович

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

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

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4Г	Кривошеев Владимир Олегович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Кривошеев Владимир Олегович

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	– 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 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 производственной 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
0АМ4Г	Кривошеев Владимир Олегович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 94 с., 11 рис., 28 табл., 30 источников, 2 прил.

Ключевые слова: микротвэл, газообразные продукты деления, диоксид урана, пористость.

Объектом исследования является (ются) микротвэл.

Цель работы – на основании прямых измерений теплопроводности и температуропроводности диоксида урана, выполненных ранее, оценить влияние форморазмеров топливного сердечника на выход ГПД и целостность микротвэла в условиях эксплуатации.

В процессе исследования был рассчитан объем газообразных продуктов деления и объем пор ловушек, так же был произведен расчет распухания диоксида урана в микротвэле.

В результате исследования получены данные, которые подтверждают целостность микротвэла и показывают что частица способна удержать в себе газообразные продукты деления за счет пор-ловушек.

Степень внедрения: высокая.

Область применения: атомная промышленности.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

В будущем планируется дальнейшее рассмотрение микротвэла с точки зрения теплофизической безопасности.

Оглавление

Введение.....	7
1 Обзор литературы	8
1.1 Описание конструкции микротвэла	8
1.2 Изготовление микротвэлов	9
1.3 Контроль качества микротвэлов.....	11
1.4 Диоксид урана	13
1.4.1 Структурные и объемные изменения.....	17
1.4.2 Изменение физических свойств под действием облучения	19
1.5 Методики определения коэффициента теплопроводности	20
1.5.1 Измерение теплопроводности порошковых материалов.....	20
1.5.2 Измерения на установке «УФТИ-2»	24
1.6 Результаты исследования выхода ГПД при малых дозах облучения.....	25
2 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	34
2.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	34
2.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	35
2.1.3 SWOT-анализ.....	38
2.2 Планирование управления НИР	41
2.2.1 Иерархическая структура работ проекта	41
2.2.2 Контрольные события проекта	42
2.2.3 План проекта.....	43
2.3 Бюджет исследования НТИ.....	45
2.3.1 Расчет материальных затрат	46
2.3.2 Основная заплата исполнителей НИР.....	47
2.3.3 Дополнительная заработная плата	49
2.3.4 Отчисления внебюджетные фонды	50
2.3.5 Накладные расходы.....	51
2.3.6 Формирование затрат НИР.....	51
2.4 Организационной структура проекта.....	52

2.5 Матрица ответственности	53
2.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	55

Введение

Основным топливным материалом для энергетических ядерных реакторов до настоящего времени остается диоксид урана. Главным свойством диоксида урана является низкая теплопроводность, которая накладывает целый ряд ограничений на его эксплуатационные параметры. Кроме того, существует проблема удержания газообразных продуктов деления (ГПД) в топливном сердечнике, что является первым барьером на пути радиационной аварии.

Актуальностью данной темы является повышение теплофизической безопасности в реакторе ВВЭР-1000.

В данной работе была поставлена цель, на основании прямых измерений теплопроводности и температуропроводности диоксида урана, выполненных ранее, оценить влияние форморазмеров топливного сердечника на выход ГПД и целостность микротвэла в условиях эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнение следующих задач:

- ознакомиться с конструкцией микротвэла;
- ознакомиться с внутриреакторными исследованиями диоксида урана;
- рассчитать объем ГПД под оболочкой микротвэла и сравнить его с объемом пор-ловушек в диоксиде урана;
- рассчитать объемные изменения диоксида урана.

1 Обзор литературы

1.1 Описание конструкции микротвэла

Микротвэл (МТ) – это сферическая частица ядерного топлива, покрытая защитными слоями, для предотвращения выхода продуктов деления (ПД) за пределы микротвэла.

МТ выполнен в виде шара с диаметром 1,8 мм. Сердечник диаметром 1,5 мм состоит из диоксида урана и имеет три оболочки защиты толщиной 0,3 мм. Первая оболочка защиты состоит из пористого пиролитического графита с плотностью 1 г/см^3 и толщиной $\sim 60 \text{ мкм}$. Вторая защитная оболочка выполнена из более плотного пиролитического графита (плотностью порядка $1,8 \text{ г/см}^3$ и толщиной слоя $\sim 5 \text{ мкм}$). Третьей защитной оболочкой является слой из карбида кремния (SiC). Толщина слоя карбида кремния $\sim 85 \text{ мкм}$. На рисунке 1 представлена конструктивная схема МТ.

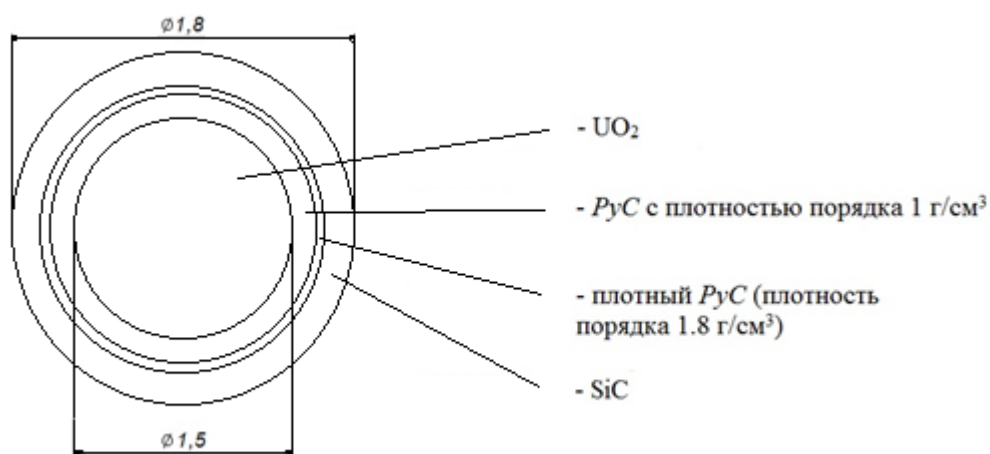


Рисунок 1 – Конструктивная схема МТ

Первый тип защитного слоя, называемый буферным слоем, имеет аморфную структуру, которая практически не повреждается осколками деления, также на нем отражаются все объемные изменения топливной микросферы (МС), обусловленные её термическим расширением и набуханием. В процессе выгорания в порах данного слоя происходит накопление продуктов деления вышедших из топливной МС, в следствии чего

уменьшается давление газообразных и легколетучих ПД на покрытия МТ и снижается напряжение в слоях. Второй слой пироуглерода практически непроницаем для газообразных продуктов деления (ГПД), а также ряда твердых ПД (Nb, Zr, Ru, а в случае оксидных МС – Се и Y). Способность этого слоя препятствовать утечке ПД и противостоять разрушению при облучении определяется плотностью, анизотропией, толщиной и микроструктурой. Недостатком второго слоя пироуглерода является то, что он не является надежным барьером для некоторых твердых ПД. Снизить утечку этих ПД удастся при помощи нанесения карбидного слоя, проницаемость которого твердыми ПД при $1100 \div 1300$ °С в $100 \div 1000$ раз меньше проницаемости второго слоя пироуглерода. Также слой карбида кремния увеличивает прочность микротвэла в целом и препятствует коррозии, обладая хорошими антикоррозийными свойствами.

1.2 Изготовление микротвэлов

Топливное ядро TRISO микротвэла может изготавливаться механическими способами (виброобкатка, окатывание, накатывание, изостатическое прессование) или физико-химическими (золь-гель процесс, иониты, оплавление порошков и гранул, разбрызгивание жидкой или суспензиеобразной массы). Наиболее перспективными для промышленного применения считаются физико-химические методы, в частности золь-гель и сорбционный процессы для окисного и карбидного топлив. В зависимости от условий проведения золь-гель процесса могут быть получены микросферы диаметром от 0,2 до 2 мм с высокой степенью однородности по размеру из различных топливных материалов и с возможностью регулирования плотности в пределах 80-99 % от теоретической. Исходным материалом служит порошок двуокиси урана (96%) с добавками окислов циркония (4%). Типичная производительность лабораторных и полупромышленных установок для

производства микросфер из ядерного топлива – 2-10 кг/ч (в расчете на уран или торий).

Полученные топливные микроядра разбраковываются по признаку сферичности на наклонных вибростолах. Некондиционные ядра идут на измельчение и повторный синтез. Кондиционные микроядра сортируются по размерам. Отбираются ядра размером 1,5 мм, более мелкие отправляют на измельчение, крупные виброокатывают до получения заданного размера. Откалиброванные сферические микроядра в кипящем слое покрывают буферным слоем пироуглерода толщиной 35 мкм. Покрытие образуется из углерода, выделяющегося при расщеплении ацетилен при температуре 1420-1430 °С.

Далее микроядра в кипящем слое покрывают слоем плотного пироуглерода толщиной 55 мкм. Покрытие наносится в среде метана (30 об.%) и водорода в условиях переменной температуры. Начинают процесс при температуре 1750 °С и заканчивают при 2100 °С. Образуется покрытие переменной плотности, возрастающей по радиусу от 1,6 до 2,0 г/см³ (средняя 1,8 г/см³). Требуемую плотность (пористость) плотного слоя пироуглерода можно оценить из условия 2-4 % пористости на 1 % выгорания тяжелых ядер. Для покрытия может быть использована смесь пропилена и водорода (88 % водорода) при температуре 1250-1280 °С. В этом случае образуется изотропное покрытие постоянной плотности. Если планируемая глубина выгорания тяжелых ядер 4-6 %, то последний метод покрытия лучше, поскольку процесс идет при более низкой температуре и уровень проникания урана в оболочку ниже. Еще более высокое качество оболочки из плотного пироуглерода по параметрам изотропности, равномерности толщины и большей плотности обеспечивает применение не одного газа (метан, пропилен), а смеси нескольких газов, например метана, пропилена и ацетилена. Процесс ведут 20-25 мин при температуре 1310-1330 °С, плавно изменяя концентрацию смеси от объемного соотношении 1:3:1 до 0,5:4:2,5; пропорцию объемов смеси и газа-носителя

меняют при этом соответственно от 1 до 0,43. Свойства графита из оболочки микротвэла приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства графита из оболочки микротвэла

параметр	размерность	величина
Плотность	г/см ³	1,9-2,0
Модуль упругости	МПа	7100 -8500
Предел прочности, изгиб/сжатие	МПа	(33-37)/(74-85)
Коэффициент теплопроводности, 20 °С/1000 °С	Вт/(м·К)	(80-90)/(35-40)
Коэффициент линейного расширения в диапазоне 20-1000 °С	10 ⁻⁵ К ⁻¹	5,8-7,0

Оболочку карбида кремния наносят в кипящем слое при температуре 1520-1535 °С в среде смеси водорода и метилтрихлорсилана (4 %). Толщина слоя составляет 60 мкм при средней плотности 3,2 г/см³.

После нанесения слоев покрытий поверхность микротвэлов отмывают кислотой от следов топлива, сушат в кипящем слое и сортируют. В процессе сортировки выбраковывают некондиционные по размерам и форме элементы, остальные делят на группы по типоразмерам. В рамках каждой группы производят отбор проб и контроль проб по следующим параметрам: пористости ядра и покрытия, удельной поверхности, степени анизотропии графита, плотности и структуры слоев покрытий, толщине покрытий, прочности на раздавливание, фазовому составу ядра и слоев покрытия, модулю Юнга, герметичности покрытия, загрязнению поверхности топливом.

1.3 Контроль качества микротвэлов

Контроль параметров проб производят разными методами:

– для исследования распределения пор по размерам в пироуглеродном покрытии используют методы – металлографический, ртутной порометрии, рентгеновского рассеяния под малыми углами;

– кажущуюся плотность слоев покрытий определяют с помощью градиентной колонки – мерной цилиндрической емкости высотой около 70 см, заполненной смесью изобутилового спирта и бромформа так, чтобы плотность линейно увеличивалась с высотой от 0,8 до 2,8 г/см³ для пироуглерода и от 0,88 до 3,3 г/см³ для карбида кремния. Части покрытия помещают в колонку и уравнивают на определенной глубине, где плотность материала равна плотности покрытия;

– прочность на раздавливание определяют по разрушению микротрещин между плоскостями. Метод чувствителен к конструкции динамометров и методике определения соответствия разрушающей нагрузки разрушающему напряжению в покрытии;

– толщину слоев без разрушения устанавливают по рентгенограмме, а с разрушением, – обмеряя шлифы;

– фазовый состав ядра определяют после разрушения микротрещины и измерения параметров отдельных фрагментов;

– параметры решетки слоев покрытия находят после разрушения микротрещины по рентгенограмме;

– фазовый состав покрытия определяют после разрушения микротрещины;

– коэффициент анизотропии кристаллической решетки устанавливают рентгеновским методом (фактор анизотропии) или оптическим (оптический фактор анизотропии);

– для выявления структуры пироуглерода шлифы подвергают травлению ионизированным кислородом (плазменное окисление) или раствором окислителя (влажное окисление). Для выявления структуры карбида кремния используют или термическое травление шлифов в атмосфере аргона при температуре 1550 °С в течение 30 мин, или электрическое травление раствором

бихромата калия в фосфорной кислоте при плотности тока $4-5 \text{ A/cm}^2$ в течение 1,5 мин, или химическое травление смесью равных объемов насыщенных растворов гидроксида натрия и ферроцианида калия;

– прочность на растяжение и модуль Юнга отдельных слоев покрытия рассчитывают по результатам испытаний на диаметрально сжатие кольца или полукольца;

– герметичность покрытия определяют обработкой микротрещин в течение 8 ч при температуре 95°C реагентом, состоящим из смеси азотной и плавиковой кислот (реагент Thorex);

– загрязнение поверхности частиц ураном контролируют измерением альфа-активности на поверхности частиц.

1.4 Диоксид урана

В настоящее время диоксид урана очень широко применяется в качестве ядерного топлива во многих реакторах. Рассмотрим некоторые характеристики диоксида урана, которые обеспечивают его работоспособность в реакторе.

Главными преимуществами диоксида урана как ядерного топлива являются: химическая стабильность, радиационная стойкость, способность выдерживать облучение значительно не меняя свои свойства и структуру.

Диоксид урана имеет кубическую кристаллическую решетку и может накапливать избыточное число атомов кислорода в решетке при высоких температурах. Зависимость кислородного коэффициента диоксида урана от температуры представлена на рисунке 2 [4]. Этот эффект учитывают, записывая стехиометрический кислородный коэффициент диоксида как $(2+x)$, где обычно $x = 0 \div 0.2$. Дополнительные атомы кислорода влияют на свойства двуокиси урана. Так например, ползучесть, спекание и скорость диффузии увеличивается при отклонении от стехиометрического состава.

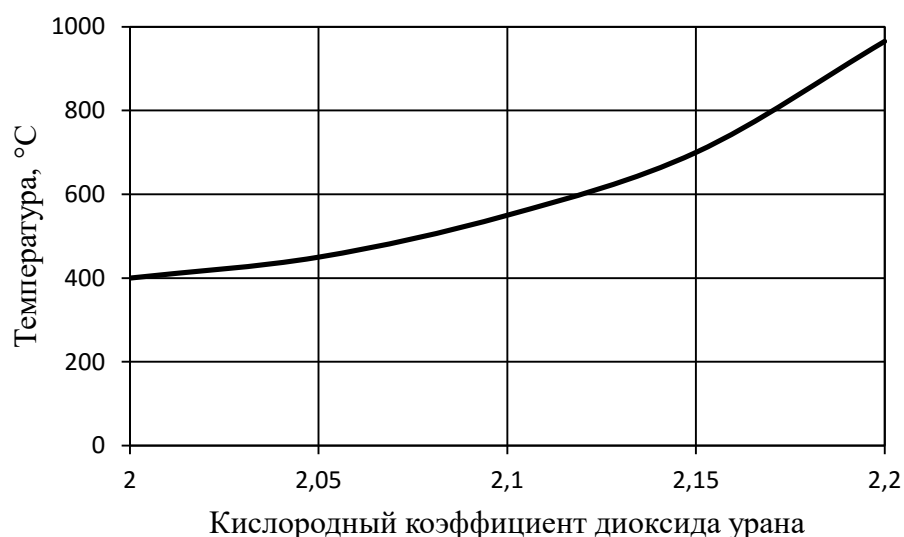


Рисунок 2 – Зависимость кислородного коэффициента диоксида урана от температуры

Температура в центре твэла определяется теплопроводностью, которая зависит от микроструктуры, облучения и стехиометрического состава. Знание теплопроводности для расчетов температур топлива очень важно и лежит в основе многих исследований. В таблице 2 представлены теплопроводности для диоксида урана теоретической плотности.

Таблица 2 – Теплопроводность диоксида урана теоретической плотности

T, °C	T, °K	λ , Вт/м·K
0	273	10,35
27	300	9,7
100	373	8,46
200	473	7,15
300	573	6,19
400	673	5,46
500	773	4,88
600	873	4,03
700	973	3,71
800	1073	3,43

Продолжение таблицы 2

T, °C	T, °K	λ , Вт/м·K
900	1173	3,2
1000	1273	3,1
1100	1373	3
1200	1473	2,84
1300	1573	2,7

Характер зависимости теплопроводности от температуры при теоретической плотности хорошо известен и представлен на рисунке 3.

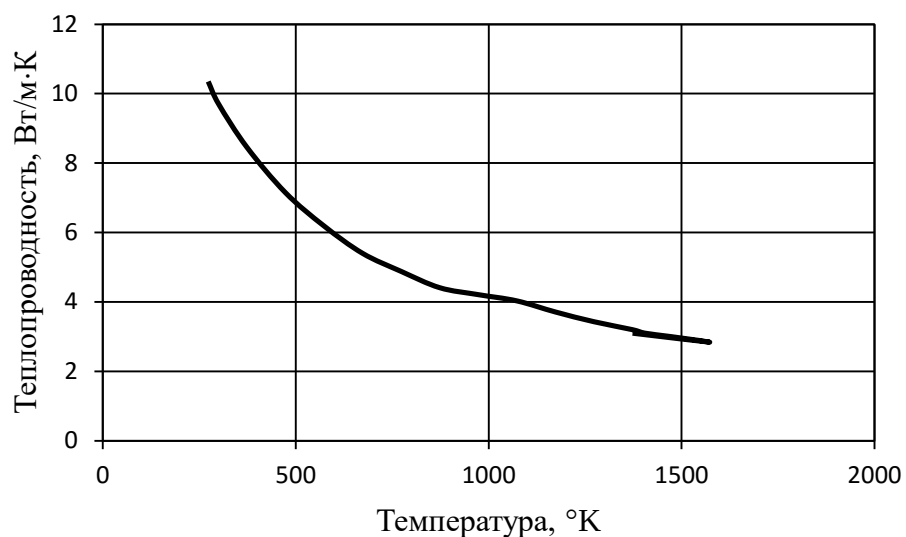


Рисунок 3 – Зависимость теплопроводности диоксида урана теоретической плотности от температуры

На рисунке 4 представлена зависимость коэффициента термического расширения диоксида урана от температуры [4].

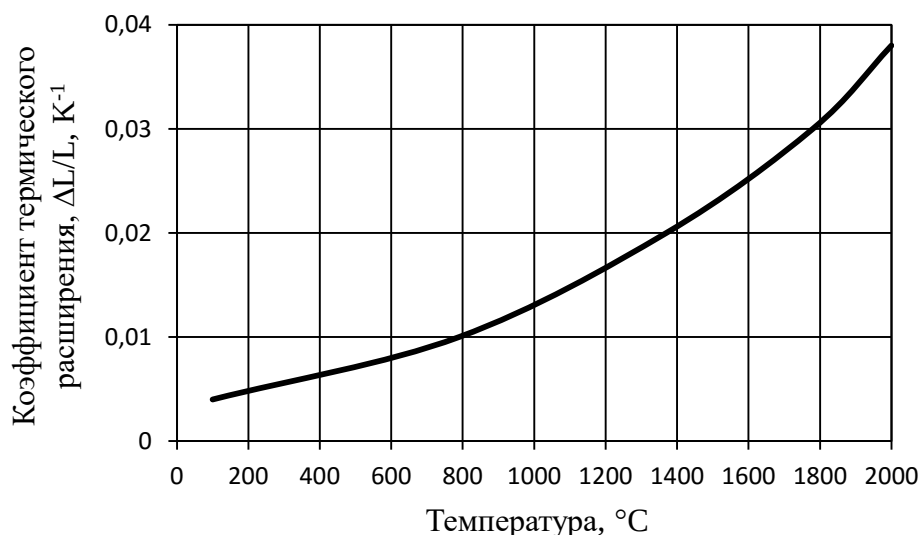


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента термического расширения диоксида урана от температуры

Чрезвычайно низкая теплопроводность урана, падающая с ростом температуры, приводит к возникновению высоких градиентов температуры в топливе. В свою очередь, высокие температуры и градиенты температуры в диоксиде урана способствуют изменению его структуры, уплотнению и т.д.

Разрывная прочность диоксида урана примерно равна 71 МПа, а модуль упругости (Модуль Юнга) $E = 2,26 \cdot 10^5$ МПа. Разрывная прочность растет с температурой. Отмечается также его хорошая коррозионная стойкость в жидких металлах и удовлетворительная в воде.

Таблетки диоксида урана для сердечников ТВЭЛОВ изготавливают методом порошковой металлургии: активированный длительный истиранием в шаровой мельнице порошок диоксида урана смешивается с пластификатором, прессуется при невысокой температуре и затем спекается в инертной атмосфере водорода, аргона или гелия при температуре 2100 °К в течении нескольких часов. Плотность приготовленного таким образом керамического материала таблеток, как правило, лежит в интервале от 92 % до 97 % теоретической (т.е. общая пористость (Π) составляет от 3 % до 8 %). Размер зерен колеблется в

пределах от 5 мкм до 15 мкм. Поры обычно имеют круглую форму (средний размер пор 2 мкм) и располагаются как внутри зерен так и на границах зерен.

Можно считать что при $\Pi \geq 7 \%$ преобладает открытая пористость (поры преимущественно находятся на границах зерен), а при $\Pi < 7 \%$ – закрытая (поры преимущественно располагаются внутри зерен).

1.4.1 Структурные и объемные изменения

Диоксид урана обладает более высокой радиационной стойкостью по сравнению с металлическим ураном и его сплавами. При выгорании (до 10^{18} дел/см³) период решетки увеличивается, также расширяются рентгеновские линии, это связано с накоплением радиационных дефектов. Отжиг радиационных дефектов в UO₂ происходит в две стадии – при 200 °С и 500 °С; после нагрева до 900 °С происходит полное восстановление структуры. При выгораниях порядка 10 % диоксид урана переходит в аморфное состояние, при низких флюенсах данный процесс незаметен. Этот результат можно объяснить тем, что изменяется стехиометрический состав соединений из-за уменьшения процентного содержания урана. Вклад в изменение структуры. При больших выгораниях, вносят не обычные радиационные дефекты, а изменение химического состава связанное с накоплением твердых и газообразных продуктов деления.

Твердые продукты деления диффундируют в матрице, затем происходит их выделение на границах зерен или около пор. Газообразные продукты деления приводят к газовому распуханию. Особенностью распухания диоксида урана является то, что при малых выгораниях (до $1,4 \cdot 10^{21}$ дел/см³) его скорость составляет 0,16 % на каждые 10^{20} дел/см³, то начиная с выгорания примерно равного $2 \cdot 10^{21}$ дел/см³, данная скорость уже составляет 0,7% на каждые 10^{20} дел/см³. На рисунке 5 представлена зависимость распухания диоксида урана под действием облучения [4].

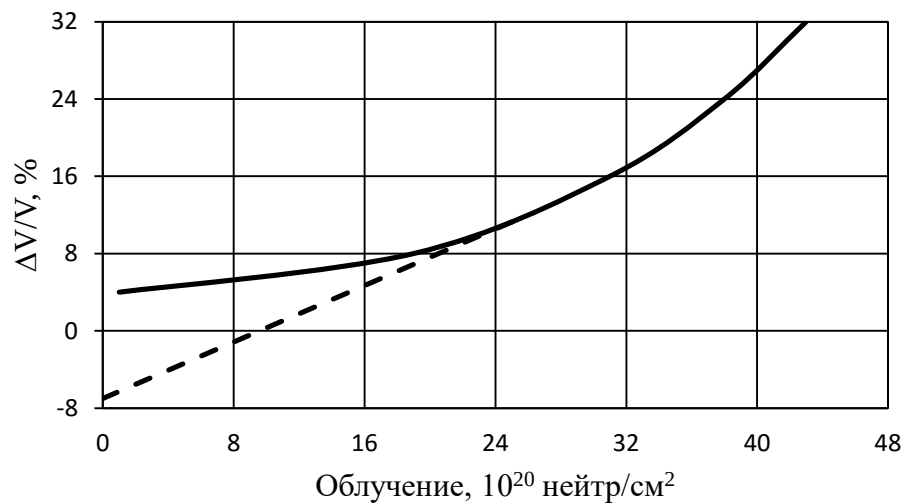


Рисунок 5 – Распухание диоксида урана под действием облучения

Если экстраполировать ветвь кривой на рисунке 4 к нулевым выгораниям, она пересечет ось в точке примерно соответствующей 9 %, что отвечает пористости диоксида урана. Это может говорить о том, что слабое начальное распухание диоксида урана связано с заполнением пористости, существовавшей в исходном состоянии. Накопление газа внутри оболочки микротвэла может играть важную роль. Это можно связать с тем, что в процессе миграции газа к поверхности твэл происходит его захват на точечных дефектах, дислокациях и границах зерен с последующим высвобождением. На рисунке 6 представлена зависимость газовыделения от выгорания [4], данная кривая имеет сходства с кривой распухания.

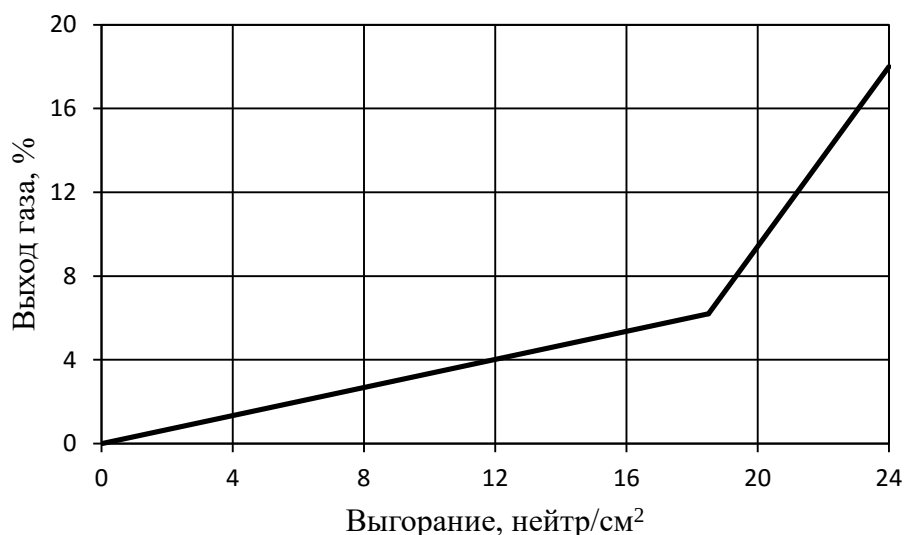


Рисунок 6 – Зависимость газовыделения от выгорания

Это указывает на то, что захват и удерживание газа внутренней технологической пористостью контролируют скорости обоих процессов. Специальное создание такой пористости может стать эффективным способом для увеличения ресурса работы микротвэла.

1.4.2 Изменение физических свойств под действием облучения

Низкотемпературная теплопроводность UO_2 монотонно уменьшается с ростом флюенса, однако отжиг при 900 °С приводит к почти полному (около 90 %) восстановлению исходной величины. Это указывает на определяющую роль в уменьшении теплопроводности радиационных дефектов. При высоких температурах облучения (более 1600 °С) параллельно с радиационными эффектами идет перекристаллизация спеченного материала, сопровождающаяся ростом столбчатых кристаллов, вследствие чего теплопроводность образцов несколько повышается, хотя это повышение и меньше ожидавшегося.

Электропроводность UO_2 при облучении в интервале температур 50 - 970 °С также несколько снижается, хотя эффект здесь гораздо меньше, чем для чистого урана. Это связано с тем, что по своим электрическим свойствам

диоксид относится к полупроводникам, для которых влияние на электропроводность процессов рассеяния электронов на дефектах незначительно.

Изменение температуры плавления диоксида под облучением, зафиксировано в ряде экспериментов, хотя количественные результаты различных исследователей не совпадают. Так радиационные дефекты почти не влияют на температуру фазовых переходов, то наблюдаемые изменения температуры плавления должны являться следствием изменения состава материала вследствие выгорания.

1.5 Методики определения коэффициента теплопроводности

1.5.1 Измерение теплопроводности порошковых материалов.

Для виброзасыпных топливных сердечников используется метод плоского неограниченного слоя с внешним нагревом образца порошкового топлива (естественного обогащения) от автономного источника тепла – нагревателя [10, 11]. Естественно, что эта данная установка позволяет изучать коэффициент теплопроводности и компактных материалов в виде втулок, дисков, таблеток из любых керамических материалов, в том числе и керамических диэлектрических и изоляционных материалов.

Исследуемый материал записывается или закладывается в оболочку формы устройства, представленного на рисунке 7, которая нижней торцевой поверхностью прижимается к теплоприемнику, а верхней к нагревателю. С использованием показаний микроТЭП определяется коэффициент теплопроводности образца по формуле

$$\lambda(T) = \frac{N\varphi_1\varphi_2\varphi_3\Delta Z_0}{S_{\pi}(\Delta T_2 - k\Delta T_1)} - \lambda \frac{S_{об}}{S_{\pi}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{об}$ – коэффициент теплопроводности материала оболочки, Вт/(м · град);
 N – мощность нагревателя, Вт; φ_1 – коэффициент, учитывающий перетечки
тепла по элементам узла крепления нагревателя; φ_2, φ_3 – коэффициенты,
учитывающие потери тепла с боковой поверхности нагревателя и образца;
 ΔZ_0 – расстояние между сечениями образца, в которых располагаются
микроТЭП; $S_{об}, S_{п}$ – площади поперечных сечений оболочки и порошка, м²;
 $\Delta T_1, \Delta T_2$ – разности показаний микроТЭП при выключенном и включенном
нагревателях, К; k – коэффициент, учитывающий как изменяется, при
включенном нагревателе, теплопроводность [12].

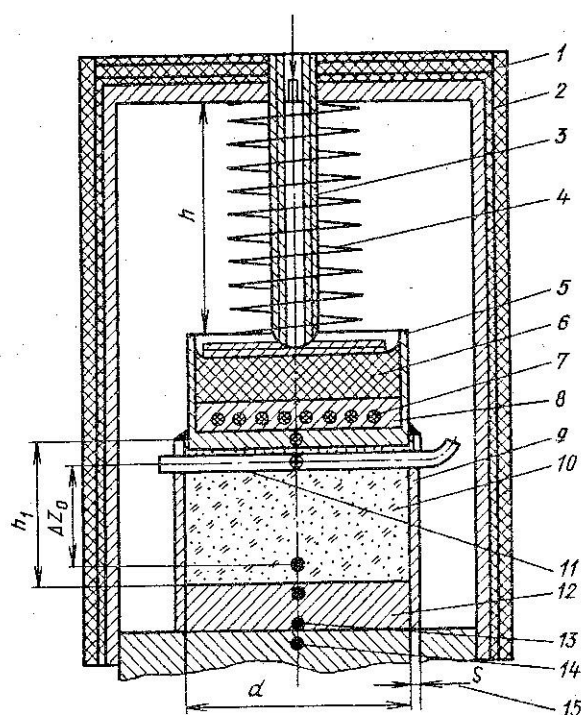


Рисунок 7 – Устройство для измерения теплопроводности порошковых
материалов:

1, 6 – теплоизоляционные материалы; 2 – корпус; 3 – прижимной винт;
4 – пружина; 5 – корпус нагревателя; 7 – нагреватель; 8, 10 – металлический и

исследуемый порошки; 9 – оболочка формы; 11, 13, 14 – микроТЭП; 12 – дно формы; 15 – теплоприемник ($h = 30$ мм, $h_1 = 12$ мм, $d = 20$ мм, $S = 0,2 \div 0,3$ мм)

Формула (1) получена из условия изотермического распределения температуры в поперечном сечении образца. Для проверки выполнимости этого условия методом интегральных уравнений [13] рассчитывались значения температуры элементов устройства при наличии внутренних источников тепла.

В результате расчетов установлено:

- распределение температур в радиальном направлении формы близко к изотермическому;

- подогрев различных слоев порошка при изменении мощности нагревателя прямо пропорционален толщине слоя изучаемого материала и потоку тепла с поверхности нагревателя. При этом подогрев участков оболочки и слоя порошка, размещенных между произвольными сечениями различается не более чем на 8 %.

При данной конструкции устройства для определения коэффициента теплопроводности порошковых материалов применение формулы (5.9) возможно при выполнении условия $\lambda_{\text{п}} S_{\text{п}} / \lambda_{\text{об}} S_{\text{об}} > 6$.

В лабораторных условиях общепринята компенсация перетечек тепла специальными нагревателями [12]. В условиях реакторного эксперимента для получения одного значения коэффициента теплопроводности образца необходимо проводить измерение температур в стационарных состояниях: до и после включения нагревателя [10, 12]. При этом плотности потоков нейтронов и γ - излучения должны оставаться постоянными. По методике, описанной в [10], для этих условий рассчитываются коэффициенты φ_2 и φ_3 в том случае, когда равны температуры теплоприемника и корпуса 2 (рисунок 7). Установлено, что $\varphi_2 = 0,85 \div 1$ при термосопротивлении 0 - 4 К/Вт и коэффициент теплоотдачи боковой поверхности нагревателя равен

$\alpha = 35 \div 75 \text{ Вт/}(\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $\varphi_3 = 0,85 \div 1$ если критерий Био равняется $0,3 - 20$ и параметр $\gamma = 0 \div 0,32$.

При этом

$$\gamma = 2L \sqrt{\frac{\alpha}{\bar{\lambda}d}}, \quad (2)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{\pi}S_{\pi} + \lambda_{об}S_{об}}{S_{\pi} + S_{об}} \quad (3)$$

где $\bar{\lambda}$ – эффективный коэффициент теплопроводности образца, $\text{Вт/}(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Следовательно, можно обеспечить условия, при которых большая часть тепла переносится по образцу, а потери тепла могут быть корректно учтены.

Коэффициент φ_1 определяется экспериментально по показаниям ТЭП, расположенных в прижимном винте. Для устройства, представленного на рисунке 7, $\varphi_1 = 0,9 \div 0,95$.

С учетом проведенных расчетов и результатов работы [10] относительная неисключенная методическая погрешность определения λ_{π} не превышает 15 % при $\lambda_{\pi} > 3 \text{ Вт/}(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Относительные измерения λ_{π} до, в процессе облучения и после облучения могут быть проведены с погрешностью 10 %, так как при этом неопределенности геометрических параметров S_{π} , ΔZ_0 и $S_{об}$ в меньшей степени влияют на точность измерений.

Несколько слов о принципиальной необходимости проведения измерения коэффициента теплопроводности изучаемого материала в одном устройстве до, в процессе и после реакторных условиях. Очень часто в ядерной энергетике используются керамические материалы (чаще всего в качестве электроизоляционных покрытий, элементов гермовводов и т.п.), имеющие сравнительно большие значения коэффициента теплопроводности при большом разбросе значений его из-за малейших погрешностей измерений или неотработанности технологии изготовления деталей из этих материалов. Влияние же облучения на изменение коэффициента теплопроводности может быть на уровне разброса исходных его значений. В этом случае измерения на

больших выборках образцов до облучения и в процессе облучения приводят к большим статистическим погрешностям. Поэтому гораздо целесообразнее набирать статистику, проводя измерения поочередно на каждом образце выборки до облучения и в процессе его (или после облучения) в одном измерительном устройстве. Такой, несколько непривычный, подход к процессу измерения и последующей обработки результатов оказывается весьма плодотворным.

1.5.2 Измерения на установке «УФТИ-2»

В 2014 году были проведены измерения теплофизических свойств конструкционных и топливных материалов методом импульсного нагрева на установке «УФТИ-2». Значимость данной работы состояла в важности теплопроводности реакторного топлива как эксплуатационного параметра. Который характеризует, во-первых, теплоотдачу к теплоносителю в штатных условиях эксплуатации, во-вторых, термopочность в переходных и аварийных режимах. Измерению теплофизических свойств (ТФС) подверглось модельное топливо в виде таблеток двуокиси урана.

Для определения геометрических параметров исследуемого образца были проведены измерения массы, толщины и диаметра, по результатам данных измерений рассчитывалась геометрическая плотность образцов. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Масса, габаритные размеры, геометрическая плотность исследуемых образцов U_1-1 и U_1-2

Образец	L, мм	D, мм	m, г	ρ , г/см ³
U_1-1 (основной)	4.02	10.96	3.934	10.37
U_1-2 (вспомогательный)	4.02	10.96	3.897	10.28

В результате проведенных измерений были получены термограммы. Результаты обработки термограмм представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты обработки термограмм для образцов U_1-1, U_1-2 (U_1-2 – вспомогательный)

№ измерения	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	$C_p, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
1	2.8485	236.6378	7.0709
2	2.8783	237.5412	7.1721
3	2.8183	240.4015	7.1072
Среднее значение	2.8483	238.1935	7.1167

Полученные результаты были сравнены с рекомендуемыми данными представленными в таблице 5.

Таблица 5 – Рекомендуемые справочные данные по ТФС двуокиси урана

Образец	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	$C_p, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
Двуокись урана	2.885	238.68	7.14

Из сравнения видно, что значения относительно схожи, несколько завышенные или заниженные значения объясняются систематической погрешностью. Выявлены отклонения определения температуропроводности, удельной теплоемкости и теплопроводности, они составили соответственно 3 %, 6,4 % и 2 %.

1.6 Результаты исследования выхода ГПД при малых дозах облучения

Наиболее удобной для аналитического описания выхода ГПД из облучаемого керамического топлива оказалась известная модель эквивалентных сфер [14]. Компактный диоксид урана в виде тела любой формы и плотности менее теоретической имеет открытую поверхность, существенно большую, чем геометрическая поверхность этого тела, причём открытая поверхность зависит от плотности диоксида, как это показано на рисунке 8. В свою очередь, открытая поверхность топлива S_T и радиус эквивалентной сферы a связаны между собой соотношением

$$a = \frac{3}{S_T}. \quad (4)$$

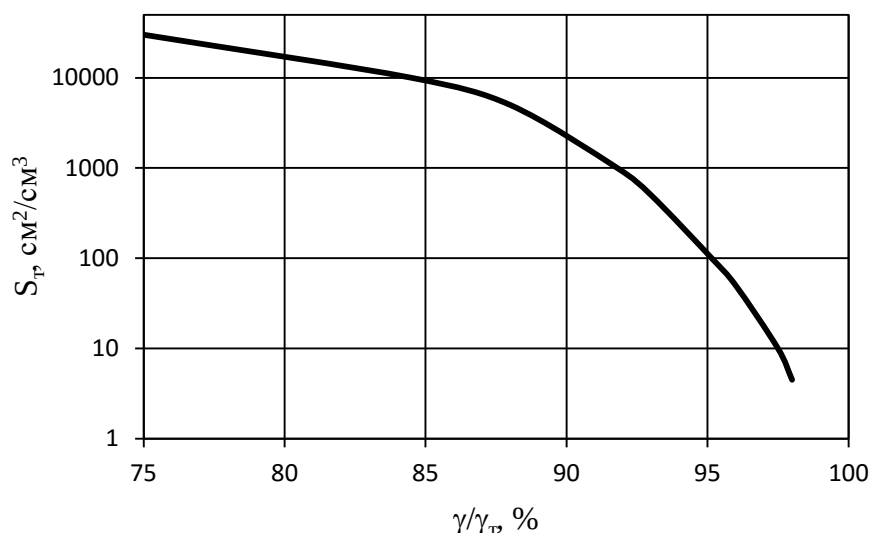


Рисунок 8 – Зависимость открытой пористости UO_2 от его относительной плотности

Приведенную на рисунке 8 зависимость можно аппроксимировать интерполяционной формулой, удобной для расчетов [15]:

$$\gamma' = 2.52 + 0.16 \lg a' - [0.085 (\lg a')]^2, \quad (5)$$

где $\gamma' = \gamma - 8,5$; $a' = a - 1,26 \cdot 10^{-4}$; $\gamma_T = 10,97 \text{ г/см}^3$ – теоретическая плотность диоксида урана; γ – плотность топлива.

Если полагать, что выход ГПД определяется объемной диффузией из эквивалентного зерна радиусом a , то решение уравнения (для i -го изотопа)

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_i \Delta c_i + f y_i c_i \quad (6)$$

с начальными и граничными условиями

$$c_i(r = a, t = t) = 0; \quad c_i(r = r, t = 0) = 0$$

имеет вид:

для скорости выхода радиоактивных атомов

$$R = 4\pi a^3 f \left\{ \sqrt{\frac{D}{a^2 \lambda}} \operatorname{cth} \sqrt{\frac{a^2 \lambda}{D}} - \frac{D}{a^2 \lambda} - 2e^{-\lambda t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\pi^2 n^2 D/a^2 \lambda}}{n^2 \pi^2 + \lambda a^2/D} \right\}; \quad (7)$$

для относительного выхода стабильных атомов

$$F = 1 - \frac{6a^2}{90Dt} + \frac{6a^2}{\pi^2 Dt} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi^4} e^{-\frac{n^2 \pi^2 Dt}{a^2}}, \quad (8)$$

где c_i – концентрация i -го изотопа в топливе; D_i – коэффициент диффузии; f – плотность делений, $1/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$; y_i – выход i -го изотопа на деление; λ_i – постоянная распада i -го изотопа.

Относительно объемных изменений UO_2 в процессе облучения эта модель ничего не рекомендует т.е. предполагается, что $a = \text{const}$.

В процессе экспериментов изучался выход изотопов ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{138}Xe и ^{133}I , ^{135}I .

Характеристики исследуемых образцов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики исследуемых образцов

Вид топлива	Способ получения	Плотность, г/см^3	Радиус эквивалентной сферы, мкм
$\text{UO}_2\text{-I}$	Электролиз расплава $\text{UO}_2 + \text{KCl}$	10,5	45
$\text{UO}_2\text{-II}$	Аммонийный, прессование при $1,5 \text{ м/см}^2$, спекание, дробление, рассеивание на фракции	$10,2 \pm 0,1$	30

Температура облучения образцов составляла 1400°C , что соответствует области термически активированной диффузии, и в то же время упругость пара UO_2 настолько мала, что уносом ГПД с испарением можно пренебречь.

Если внести понятие постоянной утечки, определяемой как $\nu = R(t)/N(t)$ (где $N(t)$ – количество атомов ГПД в образце UO_2), можно показать, что для изотопов с $D/a^2\lambda < 1$ ν связано с D соотношением

$$\frac{\nu}{3(\lambda + \nu)} = \sqrt{\frac{D'}{\lambda}} \operatorname{cth} \sqrt{\frac{\lambda}{D'}} - \frac{D'}{\lambda} - 2e^{-\lambda t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n^2 \pi^2 \frac{D'}{\lambda} t}}{n^2 \pi^2 + \frac{\lambda}{D'}}, \quad (9)$$

где $D'=D/a^2$ – приведенный коэффициент диффузии.

По значениям постоянной утечки ν для изотопов ^{133}Xe , ^{135}Xe и ^{138}Xe [16] и по формуле (9) были вычислены значения коэффициента диффузии D в зависимости от дозы облучения.

Очевидно, что коэффициент диффузии атомов ГПД в кристаллической решетке UO_2 изменяться не может, поскольку решетка устойчива до весьма глубоких выгораний (примерно 20 %). Следует, видимо, приписать снижение D к каким-то ловушкам, образующимся в процессе облучения и выводящим атомы ГПД из процесса миграции, что «кажущимся» образом влияет на снижение D_K с дозой облучения. Поэтому снижающийся коэффициент диффузии назовем «кажущимся» коэффициентом D_K .

В таблице 7 приведены сводные данные стационарных значений D_K в начале эксперимента и при выходе D_K на нижний стационарный уровень.

Наблюдаемое снижение кажущегося коэффициента диффузии объясняется следующим образом. Известно, что наличие точечных дефектов (вакансий) в облучаемом материале способствует ускорению диффузии. Таким образом, наличие высокой концентрации их при дозе примерно 10^6 дел/см³ способствует хорошей «транспортировке» изотопов ксенона, пока зерна еще не содержат большого количества внутризеренных стоков. Причем, поскольку время жизни ^{133}Xe велико, ^{135}Xe меньше, а ^{138}Xe мало, эти изотопы, будучи соответственно «транспортированы» из разных по глубине слоев зерна (самый глубокий слой – ^{133}Xe), дают и разные значения D_K : для ^{133}Xe – наибольшее и т.д.

Таблица 7 – Изменение кажущегося коэффициента диффузии в процессе облучения

Образец	Изотоп	Доза облучения, дел/см ³	Кажущийся коэффициент диффузии, см ² /с	
			Начало облучения, D _{нк}	Конец облучения, D _{кк}
UO ₂ -I	¹³³ Xe	8·10 ¹⁸	3,5·10 ⁻¹²	5·10 ⁻¹⁷
	¹³⁵ Xe		1,2·10 ⁻¹³	6·10 ⁻¹⁶
	¹³⁸ Xe		10 ⁻¹²	6·10 ⁻¹⁴
UO ₂ -II	¹³³ Xe	10 ¹⁹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁷
	¹³⁵ Xe		10 ⁻¹⁴	5·10 ⁻¹⁷
	¹³⁸ Xe		5·10 ⁻¹³	9·10 ⁻¹⁴

По мере облучения в кристаллической решетке UO₂ возникает все большее количество скоплений точечных дефектов, в данном случае вакансий, которые выполняют роль пор-ловушек для мигрирующих атомов ГПД, выводя их из процесса диффузии, что выражается в кажущемся снижении коэффициента диффузии. При некоторой дозе влияние обоих факторов уравнивается и коэффициент диффузии становится численно равным его значению в неповрежденном кристалле. Это значение (примерно 10⁻¹⁴ см²/с при T = 400 °K) соответствует пересечению всех кривых на рисунке 8.

Далее количество пор-ловушек увеличивается все больше, что приводит к существенной разнице в конечных значениях D_к – минимальное для ¹³³Xe, большее для ¹³⁵Xe и еще большее для ¹³⁸Xe. Это также соответствует значению различия в их периодах полураспада. ¹³³Xe выходит из наиболее глубоких слоев зерна, встречая на своем пути наибольшее количество пор-ловушек. Поэтому он наиболее чувствителен к ним. Аналогично, влияние пор-ловушек меньше для ¹³⁵Xe и еще меньше для ¹³⁸Xe. Наконец, при дозе

облучения примерно 10^{19} дел/см³ количество пор-ловушек в кристалле становится стабильным и уменьшение D_K прекращается. При дальнейшем облучении D_K меняться не должно и для стабильных ГПД, так же как и для долгоживущего изотопа ^{133}Xe , оно будет иметь значение примерно $4 \cdot 10^{-17}$ см²/с при 1400 К.

Полученные результаты позволяют определить значения параметров диффузии ГПД в UO_2 . Полагая, что энергия активации диффузии $Q = 71700$ кал/моль ($Q = 301,6$ КДж/моль), определенная в [14], является вполне достоверной из всех экспериментальных значений кажущегося коэффициента диффузии, так как получена для долгоживущих и стабильных изотопов при выгораниях более 10^{19} дел/см³, определим по значениям D_K для ^{133}Xe величину D_0 .

Для диффузии в неповрежденной решетке UO_2 при $D_K = 10^{-14}$ см²/с множитель $D_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ см²/с, что хорошо соответствует теории [17], а для диффузии при наличии в кристаллической решетке стабильной концентрации пор-ловушек при $D_K = 4 \cdot 10^{-17}$ см²/с множитель $D_0 = 5,8 \cdot 10^{-6}$ см²/с, что близко к значению $6,6 \cdot 10^{-6}$ см /с [14]. Таким образом, окончательные параметры диффузии ГПД в решетке UO_2 в процессе облучения, т.е. при наличии пор-ловушек, имеют следующие значения: $D_0 = 6,6 \cdot 10^{-6}$ см²/с и $Q = 301,6$ кДж/моль (71700 кал/моль).

Следует отметить существенные преимущества подобной внутриреакторной методики по сравнению с послереакторными отжигами облученных образцов топлива. Первое – возможность исследования выхода короткоживущих изотопов. Долгоживущие изотопы, которые и определяются в послереакторных экспериментах, несут «интегральную» информацию о структурных нарушениях в кристаллической решетке. Короткоживущие ГПД несут информацию о том состоянии структуры, которое существует в пределах интервала времени жизни этого изотопа, т.е. мгновенном по сравнению с дозой облучения. Обладая, кроме того, разными периодами полураспада, они

взаимодействуют с разным числом дефектов структуры, что при суммарном анализе результатов позволяет видеть состояние структуры в слоях разной толщины и экстраполировать результаты на все зерно.

Второе – возможность исследования выхода ГПД из одного и того же образца в течение длительного времени, в то время как для послереакторных исследований требуется большое количество образцов (для набора статистики), облучаемых в абсолютно идентичных условиях до разных доз.

Третье – полученные результаты полностью объясняют разбросы параметров диффузии в различных сериях экспериментов, приведенных в [14]. Из рисунка 8 следует, что, облучая образцы до произвольных в пределах дозы 10^{19} дел/см², а это при плотности делений, характерных для реакторов с низким потоком нейтронов, отвечает времени облучения до 50-70 суток, можно получить в послереакторных экспериментах типичные термодиффузионные зависимости выхода ГПД, но с различными параметрами диффузии.

Далее приведены некоторые характеристики пор-ловушек, находящихся в равновесном состоянии в кристаллической решетке UO₂ [18]. Модель эквивалентных сфер не предполагает наличия в зерне UO₂ никаких дефектов типа пор-ловушек, поэтому в уравнении (6) не хватает одного члена, характеризующего их наличие. Введем для учета захвата атомов ГПД порами-ловушками коэффициент $\chi(t)$. Тогда уравнение (6) запишется в виде

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\Delta c + fy - \lambda c - \chi(t)c. \quad (10)$$

При этом, естественно, полагаем, что в пределах эксперимента, т.е. до дозы 10^{19} дел/см³, $D = \text{const}$. Поскольку $\chi(t)$ неизвестным образом зависит от времени, уравнение (10) решаем только для начального ($\chi=0$) и конечного ($\chi=\text{const}$) стационарных значений D' . Можно показать, что решение имеет вид

$$\frac{\nu^*}{3(\lambda + \nu^* + \chi)} = \sqrt{\frac{D'}{\lambda + \chi}} \operatorname{cth} \sqrt{\frac{\lambda + \chi}{D'}} - \frac{D'}{\lambda + \chi}. \quad (11)$$

Следует иметь в виду, что экспериментально определялась не величина ν^* , представляющая собой отношение утекающих в единицу времени атомов

ГПД к их количеству в кристаллической решетке, а ν^* – отношение утекающих атомов ГПД к их количеству в зерне (кристаллическая решетка + поры). В стационарном состоянии

$$\nu^* = \nu \frac{\lambda + \chi}{\lambda}. \quad (12)$$

Из соотношения 11 с учетом 12, полагая $D'/\lambda + \chi < 1$, можно получить

$$\chi = \lambda \left[\frac{D_{\text{нк}}}{D_{\text{кк}}} - 1 \right], \quad (13)$$

где $D_{\text{нк}}$ – значение кажущегося коэффициента диффузии в начале эксперимента и $D_{\text{кк}}$ – в конце. Для всех значений $D_{\text{нк}}$ и $D_{\text{кк}}$, приведенных в таблице 7 среднее значение величины $\chi = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Зная величину χ , можно определить среднее время миграции атомов ГПД до попадания в пору-ловушку:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\chi}; \quad (14)$$

среднюю длину пробега до попадания в пору-ловушку:

$$\bar{l} = \sqrt{\frac{D_{\text{кр}}}{\chi}} \quad (15)$$

и среднюю концентрацию пор-ловушек, способных захватывать атомы ГПД (т.е. свободные поры ловушки), полагая, что расстояние между ними близко к средней длине пробега и что расположены они по кубической решетке:

$$C_{\text{св.п.л}} \approx \frac{1}{(\bar{l})^3}. \quad (16)$$

Принимая значения $\chi = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $D_{\text{кр}} = 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$, получи: время жизни $\tau = 100 \text{ с}$, длину пробега до поры ловушки $l = 10^{-6} \text{ см}$ и равновесную концентрацию свободных пор ловушек $C_{\text{св.п.л}} = 10^{18} \text{ 1/см}^3$.

Можно показать [19], что постоянная ухода в поры-ловушки χ выражается соотношением

$$\chi = 4\pi\rho_{\text{п.л}}D_{\text{кр}}C_{\text{п.л}}, \quad (17)$$

где $\rho_{\text{п.л}}$ – радиус поры ловушки.

Из 17 радиус поры-ловушки равен

$$\rho_{\text{п.л}} = \frac{\chi}{4\pi D_{\text{кр}} C_{\text{п.л}}} = 10^{-7} \text{ см.} \quad (18)$$

Таким образом, анализ внутриреакторных прецизионных результатов по кинетике выхода атомов ГПД из керамического ядерного топлива позволил вскрыть весьма важные процессы, проходящие в нем в ходе облучения, и определить существенные характеристики этих процессов.

Результаты внутриреакторных исследований количества газов под оболочкой ТВЭЛов с керамическим топливом позволили еще глубже вскрыть существенные стороны процессов газовыделения и структурных изменений.

2 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время одним из главных аспектов научной разработки является поиск источников финансирования с помощью оценки коммерческой ценности. Данная оценка поможет разработчику определить состояние и перспективы развития разрабатываемой технологии на экономическом рынке, а также найти партнеров и конкурентов.

В данной диссертационной работе показаны преимущества оксидного микротвэла в условиях эксплуатации в ядерном реакторе, а именно, его термическую стабильность формразмеров и устойчивость.

2.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Целевым рынком микротоплива являются рынок топливных элементов для ядерных реакторов. В качестве потребителей продукции МТ рассматриваются госкорпорации Росатом и Атомэнергопром, атомные электростанции на тепловых и быстрых нейтронах, исследовательские институты и реакторы.

Основными потребителями микротоплива являются атомные электростанции, подводные лодки. Сегментирование рынка МТ производится по типу используемого реактора. В зависимости от типа реактора используются разное покрытие и толщина оболочки, обогащение топлива по изотопу U^{235} . Атомные электростанции работают на тепловых, промежуточных и быстрых нейтронах. В таблице 13 произведено сегментирование рынка МТ по типу работы атомных электростанций.

Таблица 13 – Сегментирование рынка микротоплива

		Тип реактора		
		На быстрых нейтронах	На резонансных нейтронах	На тепловых нейтронах
Потребность	Сильная			
	Слабая			

Микротопливо предполагает занять рынок атомных электростанций, работающих на тепловых нейтронах. Основным предполагаемым потребителем является реакторы ВВЭР. Они составляют более 47 % атомных электростанций эксплуатируемых в России и за рубежом. Примером действующих энергоблоков реактора ВВЭР-1000 являются Нововоронежская АЭС, Калининская, Балаковская, Ростовская, Южно – Украинская, Запорожская, Ровенская, Хмельницкая, Козлодуй, Бушер, Тяньваньская, Темелин, Куданкулам. Использование нового топлива позволяет увеличить энерговыработку при минимальных изменениях конструкции ВВЭР.

2.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Основными конкурентами микротоплива являются:

- керамическое топливо используемое в настоящее время в водородных реакторах;
- дисперсионное топливо, в котором делящийся материал располагается в металлической матрице.

Для возможности противостояния конкурентам следует проанализировать их слабые и сильные стороны, а также выявить недостатки и плюсы предлагаемого решения.

Конкурент №1 – керамическое топливо имеет следующие преимущества:

- высокая радиационная стойкость;
- не взаимодействует с водным теплоносителем;
- высокая плотность делящегося материала.

Основным недостатком конкурента №1 является низкий коэффициент теплопроводности, что вызывает в топливе высокий градиент температуры, вследствие тепло от топлива до теплоносителя передается неэффективно, что снижает энерговыработку реактора.

Конкурент №2 – дисперсионное топливо имеет следующие преимущества: высокий коэффициент теплопроводности позволяет увеличить энерговыработку, металлическая матрица является еще одним барьером для газообразных продуктов деления. Недостатком дисперсионного топлива является то, что материал матрицы замещает делящийся материал, что приводит к падению плотности делящегося материала и энерговыработки. Для сохранения энерговыработки необходимо увеличения обогащения, а это приводит к нежелательным затратам.

Для более детального сравнения конкурентных технических решений проведен анализ по оценочной карте. Оценочная карта представлена в таблице 14. Анализ конкурентных технических решений определялся по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (19)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

$$K_{\phi} = (0,1 \cdot 5 + 0,08 \cdot 3 + 0,15 \cdot 5 + 0,12 \cdot 5 + 0,05 \cdot 4 + 0,08 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,12 \cdot 3 + 0,15 \cdot 5 + 0,05 \cdot 4) = 4,32$$

Таблица 14 – Оценочная карта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
2. Удобство в эксплуатации	0,08	3	5	4	0,24	0,4	0,32
3. Энергоэкономичность	0,15	5	3	4	0,75	0,45	0,6
4. Безопасность	0,12	5	3	3	0,6	0,36	0,36
5. Простота эксплуатации	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
2. Уровень проникновения на рынок	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
3. Цена	0,12	3	5	4	0,36	0,6	0,48
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,15	5	3	3	0,75	0,45	0,45
5. Срок выхода на рынок	0,05	4	5	5	0,2	0,25	0,25
Итого	1	42	41	40	4,32	3,88	3,88

Разработанный проект микротоплива является конкурентноспособным, потому что имеет высокий коэффициент теплопроводности, что увеличивает энерговыработку реактора, а также данное топливо имеет примерно такую же плотность делящегося материала, что и в керамическом. Защитное покрытие микротоплива позволяет увеличить безопасность энергоустановки за счет стойкости к перепадам температур в течение длительного времени.

2.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ предполагает комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Его применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Анализ проводится в несколько этапов.

Первый этап представляет описание сильных и слабых сторон разработанного решения, а также выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Сильные стороны разрабатываемого решения:

- повышение безопасности на АЭС;
- возможность использовать результаты реакторных исследований;
- обеспечение более высокой глубины выгорания топлива.

Слабые стороны разрабатываемого решения:

- невозможность провести реакторные испытания;
- усовершенствование существующих реакторов для использования микротвэлов;

- повышенное обогащение топлива.

Возможности научно-исследовательской работы:

- сотрудничество с АО «ВНИИАМ»;
- использование современных технологий НИ ТПУ;
- возможность изготовления образца на НЗКХ.

Угрозы научно-исследовательской работы:

- отсутствие прав на интеллектуальную собственность;
- возможность повышения цены материала;
- ужесточение норм безопасности для атомных электростанций.

На второй этапе происходит выявление соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательской работы к внешним условиям окружающей среды. В рамках данного этапа оценки коммерческой ценности построена интерактивная матрица, благодаря которой визуализируются различные

комбинации взаимосвязей областей матрицы SWOT, чтобы выявить эффективную стратегию внедрения НИР на экономический рынок. Результатом второго этапа оценки коммерческой ценности является таблица 15, в которой отображены сильные и слабые стороны, а также их взаимосвязь.

Таблица 15 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны				
Возможности		C1	C2	C3
	B1	+	+	+
	B2	+	+	+
	B3	+	+	-
Слабые стороны				
Возможности		СЛ1	СЛ2	СЛ3
	B1	+	+	-
	B2	-	-	-
	B3	+	+	-
Сильные стороны				
Угрозы		C1	C2	C3
	У1	0	+	-
	У2	+	0	+
	У3	0	-	+
Слабые стороны				
Угрозы		СЛ1	СЛ2	СЛ3
	У1	-	0	-
	У2	0	-	+
	У3	0	-	-

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

В рамках третьего этапа составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая представлена в таблице 16.

Таблица 16 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	С1. повышение безопасности на АЭС; С2. возможность использовать результаты реакторных исследований; С3. обеспечение более высокой глубины выгорания топлива	Сл1. невозможность провести реакторные испытания; Сл2. усовершенствование существующих реакторов для использования микровзлов; Сл3. повышенное обогащение топлива
Возможности:		
В1. сотрудничество с АО «ВНИИАМ»; В2. использование современных технологий НИ ТПУ; В3. возможность изготовление образца на НЗКХ.	-повышение безопасности на АЭС, благодаря сотрудничеству с ВНИИАМ - получение опытных образцов - возможность испытание первых образцов во ВНИИАМ	- проведение испытаний в лаборатории ВНИИАМ - привлечение сотрудников ВНИИАМ к научно-исследовательской работе - использование материальных ресурсов
Угрозы:		
У1. отсутствие прав на интеллектуальную собственность; У2. возможность повышения цены материала; У3. ужесточение норм безопасности для атомных электростанций.	- использование поддержки ВНИИАМ для соответствия проекта требованиям безопасности - защита интеллектуальной собственности и сертификация продукции - возможность совершенствования проекта	-поиск поставщиков материала с меньшими ценами - нахождение возможности провести измерения -привлечение госкорпорации Росатом к проекту

Результаты SWOT-анализа показали, что следует укреплять слабые стороны с помощью имеющихся возможностей, таких как сотрудничество с Курчатовским институтом; использование современных технологий НИ ТПУ; возможность изготовление образца на НЗКХ. Следует противостоять надвигающимся угрозам с помощью сильных сторон проекта

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

2.2 Планирование управления НИР

Научно-исследовательские работы (НИР) – это работы научного характера, связанные с научным поиском, проведением исследований с целью получения научных обобщений, изыскания принципов и путей создания (модернизации) продукции.

Научные исследования выполняются в группе, в состав которой входят руководитель и студент. План, определяющий комплекс работ состоит из следующих частей: определение структуры работ в рамках научного исследования; определение участников каждой работы; установление продолжительности работ; построение графика проведения научных исследований. Для каждого вида запланированной работы устанавливается соответствующая должность исполнителей.

2.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Для более эффективной работы в процессе выполнения выпускной квалификационной работы необходимо детализировать работу и разбить ее на отдельные части. Наиболее наглядно детализация работы представляется в виде структурирования. Структурирование работ было выполнено в виде

иерархической цепочки. Иерархическая структура работ позволяет определить содержание всего проекта. Разработанная структура представлена на рисунке 9.

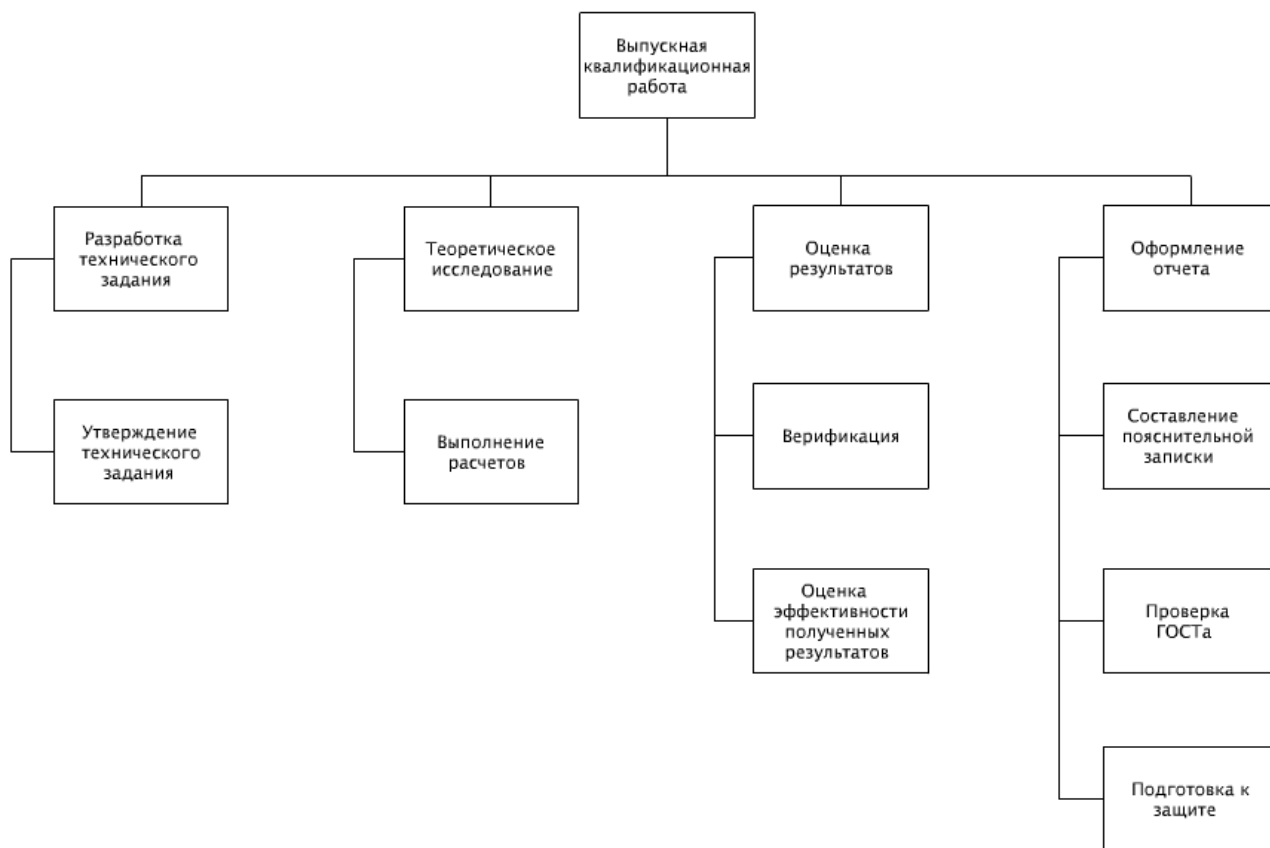


Рисунок 9 – Иерархическая структура работ

2.2.2 Контрольные события проекта

В процессе исследования необходимо определить сроки выполнения отдельных частей работы, а также форму отчета о проделанной работе. Для этого были выбраны ключевые события и поставлены сроки их выполнения. Ключевые события представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	28.01.2016	Задание по НИР
2	Утверждение технического задания	1.02.2016	Приказ ФТИ
3	Теоретическое исследование	5.02.2016	Отчет

Продолжение таблицы 17

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
4	Выполнение расчетов	18.03.2016	Отчет
5	Оценка результатов	20.04.2016	Отчет
6	Верификация	25.04.2016	Отчет
7	Оценка эффективности полученных результатов	29.04.2016	Отчет
8	Составление пояснительной записки	10.05.2016	Пояснительная записка
9	Проверка ГОСТа	13.05.2016	
10	Подготовка к защите	14.05.2015 30.05.2016	

2.2.3 План проекта

За время выполнения ВКР студенты, как правило, становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. В этом случае наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения НИР в форме диаграмм Ганта или сетевого графика. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. График строится с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. С помощью диаграммы Ганта составлен календарный план работ. Данный календарь представлен в таблице 18.

Таблица 18 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	4	25.01.2016	28.01.2016	Руководитель
2	Утверждение технического задания	3	28.01.2016	1.02.2016	Руководитель

Продолжение таблицы 18

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
3	Теоретическое исследование	43	5.02.2016	18.03.2016	Студент
4	Выполнение расчетов	32	18.03.2016	20.04.2016	Студент
5	Обобщение и оценка результатов	12	5.04.2016	20.04.2016	Студент
6	Верификация	4	20.04.2016	25.04.2016	Студент
7	Оценка эффективности полученных результатов	5	25.04.2016	29.04.2016	Руководитель, студент
8	Составление пояснительной записки	59	15.02.2016	10.05.2016	Студент
9	Проверка ГОСТа	4	10.05.2016	13.05.2016	Руководитель
10	Подготовка к защите	11	13.05.2016	30.05.2016	Студент

При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу (таблица 19).

Таблица 19 –Календарный план работ

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ														
				Январь			Февраль			Март			Апрель			Май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Разработка технического задания	Руководитель	4			■												
2	Утверждение технического задания	Руководитель	3			▨												
3	Теоретическое исследование	Студент	43															
4	Выполнение расчетов	Студент	32															
5	Обобщение и оценка результатов	Студент	12															
6	Верификация	Студент	4															

Продолжение таблицы 19

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ														
				Январь			Февраль			Март			Апрель			Май		
				1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2
7	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент	5													■	■	
8	Составление пояснительной записки	Студент	59															
9	Проверка ГОСТа	Руководитель	4														■	
10	Подготовка к защите	Студент	11															■

■ — руководитель; ■ — студент.

2.3 Бюджет исследования НТИ

Планирование бюджета научно — технического исследования должно достоверно отражать все виды расходов, связанных с выполнением разработанного решения. Формирование бюджета НТИ входят следующие группы затрат:

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

2.3.1 Расчет материальных затрат

Для выполнения научной-исследовательской работе необходимы материалы, которые используются в процессе выполнения работы. Стоимость необходимых материалов формируется исходя из цены их приобретения и платы за транспортировку, осуществляемую сторонними организациями. В том случае, если расходы, связанные с доставкой материальных ресурсов для конкретной НИОКР, незначительны, то их можно опустить.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расхi} , \quad (20)$$

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

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

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

$$Z_m = 147 \cdot 1 = 147$$

Расчет затрат на материалы приведен в таблице 20.

Таблица 20 — Затраты на покупку элементной базы и материалов

Наименование	Количество	Цена единицы товара, руб.	Сумма, руб.
Бумага	1	147	147
Ручка	0	80	80
Степлер	1	350	350
Флешка	1	500	500
Тетрадка	1	43,8	43,8
Итого, руб.	1120,8		

В ходе научного исследования было приобретено: бумага, степлер, флешка, тетрадка, две ручки. Полный расход на материалы составил 1120,8. Затраты на транспортно-заготовительные расходы не учитывались, так как они минимальны.

2.4.2 Основная заплата исполнителей НИР

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.

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (21)$$

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (22)$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} \quad (23)$$

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

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 21)

Таблица 21 – Действительный годовой фонд

Показатели рабочего времени	Руководитель	Дипломник
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52	104
- выходные дни	14	14
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48	24
- отпуск	–	–
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (24)$$

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

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

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

Для научного руководителя основная заработная плата рассчитывается следующим образом:

$$Z_{\text{п}} = 23000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 44850 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{д}} = \frac{44850 \cdot 11}{251} = 1965,5 \text{ руб}$$

$$З_{\text{осн}} = 1965,5 \cdot 21 = 41275,5 \text{ руб}$$

Расчет основной заработной платы приведен в таблице. В таблице 22 показана заработная плата по тарифной ставке для студента как стипендия за месяц.

Таблица 22 — Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Ф _д , раб.дн.	М	З _{тс} , руб.	к _{пр}	к _д	к _р	З _м , руб	З _{дн} , руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	4	5	23000	0,3	0,2	1,3	44850	1965,5	21	41275,5
Студент	46	5	3600	0	0	1,3	4680	399	125	23400
Итого З _{осн}										64,675,5

Заработная плата научного руководителя с учетом дополнительной заработной платы составляет:

$$З_{\text{п}} = 41275,5 + 4953,05 = 46228,55 \text{ руб}$$

Расчет дополнительной заработной платы приведен в следующем параграфе.

2.3.3 Дополнительная заработная плата

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

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (25)$$

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

$$З_{\text{доп}} = 41275,5 \cdot 0,12 = 4953 \text{ руб}$$

Расчет дополнительной заработной платы приведен в таблице 23.

Таблиц 23 — Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнители	З _{осн} , руб	З _{доп} , руб	З _п , руб
Руководитель	41275,5	4953	46228,5
Студент	23400	0	23400
Итого			69628,5

2.3.4 Отчисления внебюджетные фонды

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (26)$$

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

Коэффициент отчислений внебюджетные фонды составляет 0,271 для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность.

Расчет отчислений внебюджетные фонды составляет:

$$З_{\text{внеб}} = 46228,5 \cdot 0,271 = 12528 \text{ руб}$$

2.3.5 Накладные расходы

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

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (27)$$

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

В ходе приводимого исследования были затрачены средства на печать и ксерокопирования необходимых материалов. Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы Расчет на накладные расходы:

$$З_{\text{накл}} = 46228,5 \cdot 0,25 = 11557 \text{ руб}$$

2.3.6 Формирование затрат НИР

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. На основании всех данных о материальных затратах и заработных платах составлен бюджет затрат на научно-исследовательский проект, который приведен в таблице 24.

Таблица 24 — Расчет себестоимости НИР

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
1. Материалы	1120,8
2. Затраты на оплату труда работников, занятых проведением НИОКР	69628,5
3. Отчисления внебюджетные фонды	12528
7. Накладные расходы	11557

Итого себестоимость НИР	94834,3
-------------------------	---------

В ходе выполнения научного-исследования учтены затраты на оплату труда, отчисления внебюджетные фонды, накладные расходы. Основная заработная плата исполнителей работы составляет 69628,5. Исполнителями научной-исследовательской работы являются научный руководитель и студент. Время необходимое для выполнения НИР составляет 146 календарных суток.

В ходе выполнения НИР были затраты на материалы. Сумма затрат на материалы составляет 1120,8 рублей. Накладные расходы учитывают ксерокопирование и печать. Затраты на накладные расходы составили 25522,35.

Для выполнения научной-исследовательской работы потребуется сумма в размере 94834,3. Сумма учитывает все расходы и заработную плату исполнителей работы.

2.4 Организационной 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 10.

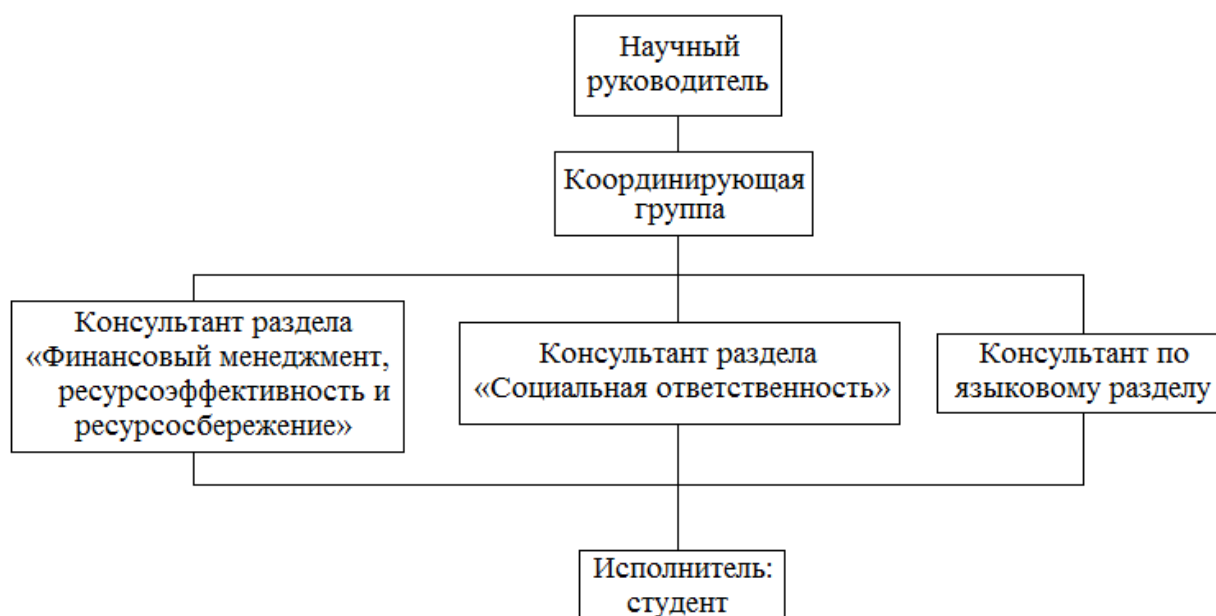


Рисунок 10 – Организационная структура научного проекта

2.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 25.

Таблица 25 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соцответственность»	Консультант по языковому разделу	Студент
Разработка технического задания	О				
Утверждение технического задания	О				
Выбор программного обеспечения	О				
Изучение материалов ПО					И
Календарное планирование	О				И
Теоретическое исследование					И
Изучение кода MCU5TPU					И

Построение модели для расчета					И
-------------------------------	--	--	--	--	---

Продолжение таблицы 25

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответственно сть»	Консультант по языковому разделу	Студент
Выполнение расчетов в ПО					И
Обобщение и оценка результатов					И
Верификация					И
Оценка эффективности полученных результатов					И
Составление пояснительной записки					И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	
Верификация					И
Оценка эффективности полученных результатов	С				
Составление пояснительной записки					И
Проверка ГОСТа	С				
Подготовка к защите					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.

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

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

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:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (28)$$

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

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

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

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

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{156513,05}{156513,05} = 1$$

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (29)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 26).

Таблица 26 — Оценка характеристик исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Оценка
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,20	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	3
3. Помехоустойчивость	0,15	4
4. Энергосбережение	0,20	4
5. Надежность	0,25	4
6. Материалоемкость	0,05	3
ИТОГО	1	

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,05 = 4$$

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}^{исп.1}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр}^{исп.2}} \text{ и т.д.} \quad (29)$$

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

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (430)$$

Таблица 27 — Эффективность разработки

Показатели	Оценка
Интегральный финансовый показатель разработки	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4
Интегральный показатель эффективности	0,25

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

