

**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
<b>Работоспособность графита в уран-графитовых реакторах</b>

УДК 621.039.524.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Мочалов Александр Михайлович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ ФТИ	Нестеров В.Н.	к.т.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
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
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.
<b><i>Общекультурные компетенции</i></b>	
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.



**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент кафедры МЕН ИСГТ, к.экон.н. Верховская М.В.
Социальная ответственность	ассистент кафедры ПФ ФТИ, к.ф.- м.н. Гоголева Т.С.
Иностранный язык	ст. преп. кафедры ИЯФТ Демьяненко Н.В.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b>	
Обзор литературы	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ ФТИ	Нестеров В.Н	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Мочалов А.М.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Мочалов Александр Михайлович

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

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

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

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

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

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей)

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Оценочная карта конкурентных технических решений</i></li> <li>2. <i>Матрица SWOT</i></li> <li>3. <i>Иерархическая структура работ</i></li> <li>4. <i>Календарный план проекта</i></li> <li>5. <i>Бюджет проекта</i></li> <li>6. <i>Определение ресурсоэффективности проекта</i></li> </ol>	
---	--

**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
0АМ4Г	Мочалов Александр Михайлович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Мочалов Александр Михайлович

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

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

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

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	Мочалов Александр Михайлович		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа включает в себя 111 с., 20 рис., 20 табл., 23 источников, 3 прил.

Ключевые слова: критический флюенс, реакторный графит, РБМК-1000, ресурс графита,

Объектом исследования является реакторный графит реактора РБМК-1000.

Цель работы: определения срока службы графита в уран-графитовых реакторах.

В процессе выполнения магистерской проводился анализ эксплуатационных параметров, влияющих на работоспособность ядерно-чистого графита.

В результате исследования получено распределение значения срока службы реакторного графита по активной зоне для РБМК-1000.

Область применения: атомная промышленность.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

## Обозначения и сокращения

АЭС – атомная электростанция;

РБМК – реактор большой мощности канальный;

ВТГР – высокотемпературный газоохлаждаемый реактор;

ГК – графитовая колона;

ГБ – графитовый блок;

СУЗ – система управления и защиты;

ГЦН – главный циркуляционный насос;

АЗ – активная зона;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

РП – реакторное пространство;

ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина

## Оглавление

Введение.....	12
1 Обзор литературы .....	14
1.1 Графит в ядерной энергетике.....	14
1.2 Кристаллическая решетка .....	17
1.3 Дефекты структуры в графите .....	18
1.4 Механизмы деградации графитовой кладки .....	20
1.5 Конструктивные особенности и эксплуатационные параметры реактора РБМК-1000.....	24
2 Расчетная часть.....	31
2.1 Результаты расчета спектра плотности потока нейтронов итерационным способом.....	31
2.2 Значение эффективного коэффициента размножения.....	33
2.3 Компенсация избыточной реактивности.....	34
2.4 Изменения нуклидного состава ядерного топлива.....	36
2.5 Распределение температурных полей по активной зоне .....	39
2.6 Распределение значения срока службы реакторного графита по АЗ.....	44
2.7 Распределение значения срока службы реакторного графита по радиусу эквивалентной ячейки.....	45
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	49
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	50
3.1.2 SWOT-анализ .....	52
3.2 Планирование управления научно-техническим проектом .....	55
3.2.1 Иерархическая структура работ проекта.....	55

3.2.2 Контрольные события проекта.....	55
3.2.3 План проекта .....	56
3.3 Бюджет научного исследования.....	59
3.3.1 Расчёт материальных затрат .....	59
3.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ).....	60
3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы .....	61
3.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы .....	63
3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды.....	64
3.3.6 Накладные расходы .....	64
3.3.7 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	65
3.4 Организационная структура проекта .....	65
3.5 Матрица ответственности .....	66
3.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	67
4 Социальная ответственность .....	71
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	71
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.....	73
4.2.1 Организационные мероприятия .....	73
4.2.2 Технические мероприятия .....	73
4.2.3 Условия безопасной работы .....	76
4.3 Электробезопасность .....	78
4.4 Пожарная и взрывная безопасность.....	79
Заключение .....	82

Список публикаций студента.....	84
Список использованных источников .....	85
Приложение А .....	88
Приложение Б.....	89
Приложение В.....	91

## Введение

Ядерный графит обладает рядом особенностей таких как, хорошая замедляющая способность, небольшое сечение поглощения тепловых нейтронов, высокая прочность, коррозионная и эрозионная стойкость, высокая температура плавления. В сумме эти уникальные свойства обусловили его широкое применение в ядерной энергетике. Однако при работе ядерного реактора свойства графита значительно изменяются вследствие изменения кристаллической решётки, вызванные смещением атомов углерода быстрыми нейтронами.

Радиационные изменения свойств графита усиливаются значительными температурными градиентами, а также неоднородностью распределения энергии быстрых нейтронов как активной зоне в целом, так и в пределах одного графитового блока. Эти постоянно действующие факторы вызывают изменения в размерах графитового блока по сечению и приводят к возникновению напряжений, которые являются причиной разрушения графитовой кладки в процессе эксплуатации реактора.

Актуальность работы. В настоящее время в Российской Федерации функционируют 11 энергоблоков АЭС с реакторами РБМК. Они производят 48 % всей электроэнергии, генерирующейся на АЭС России.

Первоначально посчитанный срок службы реактора составил 30 лет. Но в процессе эксплуатации энергоблоки подвергались постоянной модернизации, в результате которой их ресурс значительно превышал назначенный. Поэтому по истечении этого срока каждый блок прошел процедуру продления эксплуатации еще на 15 лет.

Графитовая кладка в уран-графитовых реакторах используется как основной конструкционный материал и выполняет роль замедлителя и отражателя нейтронов. Кладка является незаменимым и ограниченно ремонтоспособным узлом реактора, и поэтому она определяет ресурс работы энергоблока в целом.

В процессе эксплуатации реактора графитовая кладка находится в поле действия нейтронного и гамма-излучения, а также повышенной температуры. В результате происходит старение графита, как материала. Оно выражается в изменении геометрических размеров блоков, ухудшению теплофизических и механических свойств самого графита.

Актуальность работы по определению ресурса графита обосновано возможностью продления срока эксплуатации энергоблоков типа РБМК, продленный срок службы которых подходит к концу, что в свою очередь может обернуться большим экономическим эффектом.

Цель работы: определения срока службы графита в уран-графитовых реакторах.

Для выполнения поставленной цели ставятся следующие задачи:

- Анализ эксплуатационных параметров реактора РБМК-1000 и факторов, влияющих на работоспособность графита;
- Определение плотности потока повреждающих нейтронов;
- Определение распределения значения срока службы по активной зоне;
- Определение зависимости локального срока службы графита по радиусу наиболее напряженного графитового блока.

## 1 Обзор литературы

### 1.1 Графит в ядерной энергетике

Графит получил широкое применение в ядерных реакторах. Графит достаточно распространённый и доступный материал, который легко поддается механической обработки, имеет удовлетворительные замедляющие свойства при малом сечении захвата нейтронов. Чистый графит имеет достаточно низкое эффективное сечение захвата нейтронов ( $0,032 \cdot 10^{-24} \text{ см}^{-2}$ ). Снижение энергии нейтронов, образующихся при делении ядерного горючего, происходит в результате упругого соударения между нейтронами и атомами замедлителя. Быстрый нейтрон при каждом соударении с атомами углерода теряет 0,158 своей энергии. Поэтому для замедления быстрого нейтрона до скорости «теплого» достаточно – 110 столкновений с ядрами углерода. Последний факт объясняет почему графит используется в качестве замедлителя. По эффективности замедления нейтронов графит идёт вслед за бериллием и тяжёлой водой.

В уран-графитовых реакторах графит также является конструкционным материалом. Его применение в качестве конструкционного материала основано на том, что графит имеет высокую температуру плавления и остаётся твёрдым вплоть до температуры 4000 °С. Хотя графит и не обладает высокой плотностью, но тем не менее является материалом достаточно прочным и пластичным. Он легко обрабатывается механически. Графит имеет высокие коэффициенты теплопроводности и теплоёмкости, но при этом обладает низкой электропроводностью.

В мировой практике наиболее распространены следующие уран-графитовые реактора:

- каналные водо-графитовые с кипящей водой и с перегревом пара (РБМК);
- низкотемпературные газографитовые реакторы, в которых теплоносителем используется углекислый газ («Magnox», AGR);

– высокотемпературные газографитовые с гелием в качестве теплоносителя (ВТГР).

Несмотря на большое разнообразие конструкций кладок, есть ряд общих принципов. Кладку собирают из графитовых блоков, различных размеров и форм, подгоняя блоки друг к другу таким образом, чтобы исключить значительные зазоры между ними. Но при этом при конструировании кладки необходимо обеспечить подвижность ее деталей, чтобы избежать разрушения конструкции по причине термической и радиационной деформаций. Для предохранения графита от окисления всю конструкцию помещают в герметичный кожух, а пространство между кожухом и графитовой кладкой заполняют инертным газом.

Основными элементами кладки являются графитовые блоки, имеющие форму призмы с отверстиями. Выбор материала и конструкций графитовых блоков зависит от температурного режима графитовой кладки, типа теплоносителя и конструктивных особенностей труб технологических каналов, в которых размещаются ТВЭЛы.

В России эксплуатируются 11 энергоблоков типа РБМК. Они генерируют почти половину всей электроэнергии, которую производят на АЭС России. Графитовая кладка реактора заключена в кожух и опирается на сварные металлоконструкции, которые вместе с кожухом образуют герметичную полость, заполненную смесью гелия с азотом. Графитовая кладка реактора РБМК имеет цилиндрическую форму, которая состоит из отдельных блоков, собранных в колонны. Графитовые блоки сечением 250x250 мм имеют осевые цилиндрические отверстия. В этих отверстиях размещаются технологические каналы и каналы СУЗ. Для графитовой кладки используется графит ГР-280.

Между технологическим каналом и графитовым блоком располагаются графитовые кольца высотой 20 мм. Кольца служат для компенсации изменений в размерах графитовых блоков и самой технологической трубы во время эксплуатации реактора. Они располагаются следующим образом: одно кольцо плотно прилегает к технологической трубе, а следующие – к внутренней

поверхности графитового блока. Так кольца чередуются по всей высоте канала. Таким образом создаются радиальные зазоры, которые дают свободу для радиационно-термической усадки блока и увеличения диаметра технологической трубы.

Корпусные низкотемпературные газографитовые реакторы составляют основу атомной энергетики Англии и Франции. Активную зону таких реакторов собирают в стальном или железобетонном корпусе, устанавливаемом на опоры в бетонной шахте. Внутри корпуса имеется плита, на которой монтируется графитовая кладка, состоящая из вертикальных колонн с отверстиями по центру.

Каждую колонну набирают из отдельных блоков. Высота кладки составляет 8... 10 м, диаметр – от 14 до 16 м. В отверстия кладки загружают ТВЭЛы. Загрузка и выгрузка ТВЭЛОВ проводятся через отверстия в крышке или в днище корпуса реактора с помощью перегрузочной машины. Теплоносителем служит углекислый газ.

Реактор ВТГР. Высокотемпературный газографитовый реактор (ВТГР) является одним из перспективных реакторов IV поколения. Теплоносителем в ВТГР является гелий, что позволяет достичь значительно более высоких температур и соответственно высокого КПД (50 %).

Такие типы реакторов построены и находятся в опытной эксплуатации в ряде стран: «Dragon» в Великобритании, «Пич-Боттом» и «Форт-Сент-Врейн» в США, AVR и THTR-300 в Германии. В приложение А представлено сравнение некоторых зарубежных уран-графитовых реакторов.

Разработка ВТГР в Западной Европе возобновилась в конце 90-х годов на основе международного сотрудничества по Рамочной программе Евроатома. В 2007 году в целях создания координационного партнерства по развитию технологии HTGR в Европе была организована технологическая сеть HTR-TN, составлен план продвижения работ по разработке нового поколения промышленного реактора HTGR. Работы базировались в основном на технологии HTGR, разработанной в 1970-1990 гг. Объединенный проект RAPHAEL направлен на проведение НИОКР в областях физики активной зоны,

ядерного топлива, материалов, безопасности и объединения систем в единое целое. В проекте участвовало 34 партнера, бюджет проекта составлял 20 млн евро.

Специальное внимание уделялось техническим вопросам: поведению оболочек топлива при повышенных температурах, получению углеродных материалов, выбору термостойких и радиационно-стойких металлических материалов для корпуса реактора.

В США разработка ВТГР ведется по трем проектам: GT-MHR, NGNP (Next Generation Nuclear Plant) – для энерготехнологических комплексов и VHTR – в рамках международной программы GIF (Generation IV International Forum).

Проект NGNP разрабатывается в рамках национальной программы США по созданию АЭС нового поколения для производства электроэнергии, тепловой энергии и водорода. Этот проект финансирует министерство энергетики, руководителем его назначена Айдахская национальная лаборатория. Предполагается, что реактор должен работать при сверхвысоких температурах. Для успешного решения поставленных задач необходимо решить целый ряд проблем: разработать конструкционные материалы и топливо, которые способны обеспечить повышение температуры гелия на выходе из реактора с 850 до 1000 °С и выше; создать топливо, позволяющее работать с глубиной выгорания 150...200 (ГВт·сут)/т тяжелого металла (ТМ) и устойчивое до температуры 1800 °С; устранить значительный градиент температуры в активной зоне реактора, а также попадание горячих частиц в теплоноситель.

## **1.2 Кристаллическая решетка**

Графит – термодинамически стабильная аллотропная модификацией углерода. В графите каждый атом углерода образует ковалентную связь с тремя другими окружающими его атомами углерода. Существуют две модификации кристаллической решетки графита – гексагональная и ромбоэдрическая. Различаются эти модификации упаковкой слоёв.

Гексагональная кристаллическая решетка образована правильными шестиугольниками из атомов углерода, которые располагаются в параллельных плоскостях. Атомы углерода каждого слоя ориентированы таким образом, что совпадают с центрами шестиугольников соседних слоев (верхний и нижний). Положение параллельных плоскостей повторяется через один, при этом каждая плоскость сдвинута относительно соседней на 0,1418 нм в горизонтальном направлении.

На рисунке 1 представлена кристаллическая решетка графита.

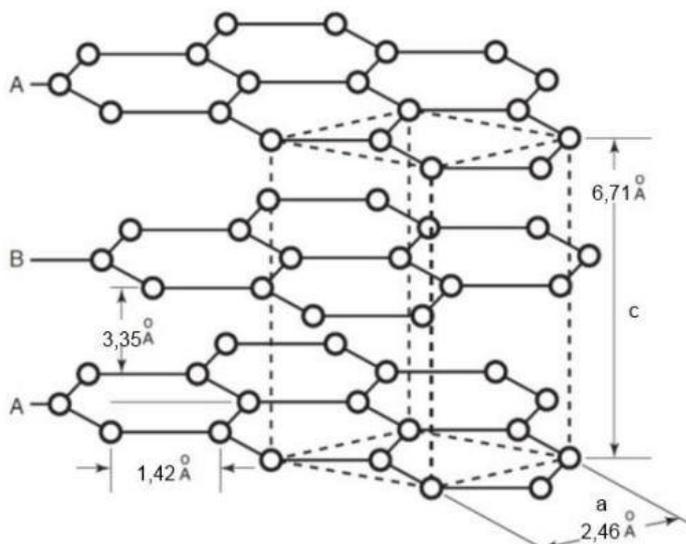


Рисунок 1 – Кристаллографическая решётка гексагонального графита.

Ромбоэдрическая решетка отличается положением плоских слоев. Повторяющиеся плоскости располагаются через два слоя, а не через один, как в гексагональной. В графите природного происхождения содержание ромбоэдрической структуры может достигать до 30%. В искусственно созданном графите наблюдается только гексагональная структура, так как при температуре 2230-3030 °С ромбоэдрический графит полностью переходит в гексагональный.

### 1.3 Дефекты структуры в графите

Дефекты в кристаллической решетке могут образовываться между слоями или же в связях сетки.

Дефекты в упаковке слоев связаны с нарушением в закономерности их чередования. В искусственно созданных графитах часто встречается турбостратная структура. В турбостратной структуре отсутствует закономерность в ориентации слоев относительно друг друга.

Второй вид дефектов кристаллической структуры в графите – нарушение в связях углеродной решетки: незаполненность части углов шестигранников графита; межузельные атомы; внедрение гетероатомов в межслоевое пространство и в вакантные узлы в решетках; краевые дефекты и т.д.

Краевые дефекты возникают, когда связь углерод-углерод не может образоваться. Причины возникновения краевых дефектов могут быть разными, например, если одна из макромолекул не оказалась в плоскости ближайших соседних макромолекул. Различные инородные атомы часто могут вступать во взаимодействие с краевыми дефектами.

При разрушении связей могут образоваться разрывы в гексагональной сетке, так называемые «клещевидные» дефекты. «Клещевидные дефекты» могут образовывать винтовые дислокации или другие искривления кристаллической решетки.

Еще один вид дефектов упаковки возникает при двойниковании кристалла. Если нормальный порядок чередования атомов в каком-либо направлении заменить на зеркально противоположный, то получится зеркально симметричная конфигурация – двойник.

Химические дефекты представляют из себя включения инородных атомов в углеродную сетку. Так, в решетку графита могут встраиваться атомы кислорода, азота, серы, фосфора, кремния и другие.

Под действием нейтронного излучения в кристаллической структуре графита образуются точечные дефекты Френкеля и Шоттки, которые под действием сопутствующего гамма-излучения и температуры облучения могут либо рекомбинировать, либо группироваться в более сложные дефекты.

## 1.4 Механизмы деградации графитовой кладки

Основными характеристиками конструкционного графитового материала являются прочность, стабильность линейных размеров, ползучесть, коэффициенты теплопроводности и теплового расширения, модуль упругости, а также стойкость графита к окислению.

В процессе эксплуатации на графитовую кладку реактора оказывают воздействие различные повреждающие факторы. Основным фактором, определяющим механизм деградации графита уран-графитовых реакторов – терморadiационная повреждаемость, в результате которой из-за радиационных повреждений кристаллической структуры графит ухудшает свои прочностные и теплофизические свойства, при этом изменяются и его геометрические параметры. Наличие внутренних напряжений приводит к нарушению целостности графитовых блоков, из которых набирается графитовая кладка. Уровень радиационных повреждений графита определяет набранный им флюенс повреждающих нейтронов.

Другим повреждающим фактором является механическое воздействие на графитовую кладку со стороны ТК при работе на мощности и инструмента при проведении регламентных работ и ремонтов: процессы перегрузки топлива, замены каналов и наборов втулок, восстановление размеров отверстий в графитовых блоках ячеек (калибровка), спрямление рядов и т.д.

Еще одним фактором, потенциально оказывающим повреждающее воздействие на графит кладки, является ее окисление. Однако, учитывая, что за содержанием кислорода в азоте на входе в графитовую кладку, а также углекислого газа на выходе ведется постоянный контроль и то, что величины этих параметров соответствует требованиям технологического регламента, окисление графита не является определяющим механизмом их деградации.

В результате облучения графита нейтронами теплопроводность  $\lambda$  резко падает. В работах [6,8] было отмечено, что максимальная скорость падения  $\lambda$  наблюдается в начальный период облучения. Различные исследования [6,8] в

этом направлении показывают, что снижение теплопроводности графита при облучении флюенсом  $2 \cdot 10^{21}$  нейтр./см<sup>2</sup> и температурой 300 °С достигает значений в 10 раз ниже, чем у необлученного материала.

Изменения теплопроводности при облучении графита могут быть объяснены уменьшением величины среднего свободного пробега фотонов, связанного с рассеянием фотонов на дефектах облучения.

Для графитов, имеющих малый размер кристаллитов и, следовательно, малую теплопроводность в исходном состоянии, относительное изменение теплопроводности при облучении происходит из-за незначительного рассеяния фотонов на границах мелких кристаллитов и, в большей степени, из-за более легкой диффузии дефектов на поверхность кристаллита.

Теплоемкость облученного графита вследствие возникшей неупорядоченности его структуры увеличивается. Различные эксперименты показали, что увеличение значения теплоемкости стремится к определенному значению при температуре  $\sim 300$  °К.

Часть смещенных атомов, возникших в результате низкотемпературного облучения графита, сохраняет избыток энергии по сравнению с равновесными атомами. Таким образом, в облученном графите возрастает его теплосодержание. Внутренняя энергия системы повышается. Скрытая или запасенная энергия (энергия Вигнера) при повышении температуры выше температуры облучения выделяется спонтанно. Запасенная энергия при уровне облучения  $\sim 10^{20}$  нейтр./см<sup>2</sup> растет практически линейно.

С увеличением флюенса свыше  $10^{21}$  нейтр./см<sup>2</sup> наступает насыщение в накоплении запасенной энергии, а ее значение достигает 500...600 кал/г. С ростом температуры облучения скорость накопления запасенной энергии быстро снижается. Так, уровень запасенной энергии графита, облученного при 750 °С, составляет лишь 9 кал/г. При этом ее выделение происходит при температуре выше 1000 °С, что не представляет опасности для эксплуатации реактора.

Между температурой начала выделения запасенной энергии и температурой облучения существует линейная зависимость. Облучение

нейтронами при низкой температуре приводит к росту прочностных свойств графитовых материалов. При дальнейшем облучении происходит накопление повреждений, что приводит к стабилизации радиационного упрочнения. Стабилизация объясняется равновесием между возникающими точечными дефектами и их разрушением.

Одним из важных свойств углеродного материала, особенно находящегося в эксплуатации в течение длительного времени, является его сопротивляемость ползучести при нагружении. Для графита, испытываемого без облучения при умеренных температурах (до 150 °С), ползучесть практически отсутствует, однако под воздействием облучения ползучесть в графите значительно увеличивается.

Графит, как и уран, обладает способностью к радиационному росту. Для графита характерен эффект ускорения ползучести при облучении в реакторе. Результаты измерения деформации ползучести при постоянной нагрузке и температуре показывают, что радиационная ползучесть графита характеризуется переходной и установившейся стадиями. Третья стадия соответствует ускоренной ползучести. Она возникает после достижения некоторого «критического» напряжения.

Пространственное распределение нейтронного потока и температуры не однородно, как по кладке в целом, так и для отдельного блока. Радиационные эффекты зависят от температуры. В центральной части кладки температура выше, поэтому накопление радиационных дефектов значительно меньше, чем на периферии кладки, где температура графита ниже. По сечению ячейки свойства графита также изменяются неодинаково. Изменения достигают максимального значения в слоях, которые контактируют с топливными каналами, где поток быстрых повреждающих нейтронов выше, а температура минимальная.

На периферии и около поглощающих стержней, где поток нейтронов несимметричный и неравномерный, радиационные повреждения в блоке будут также неравномерны и несимметричны. В результате этого в периферийных районах происходит радиационное распухание графита, которое приводит к

расширению этих участков кладки. В центральной части реактора, где температура выше, протекает процесс радиационной усадки графита. Такая неравномерность по кладке является причиной искривления как отдельных каналов, так и всей конструкции в целом.

Наличие внутренних напряжений, связанных с неравномерным распуханием, способствовало изменению формы блоков и возникновению в них продольных трещин. Трещины образовывались в блоках, находившихся в зоне максимального распухания в периферийной части кладки.

Таким образом, накопленный флюенс повреждающих нейтронов совместно с конкретным температурным режимом и механическими воздействиями определяют в данный период эксплуатации процесс деградации ГК, имеющий прогрессирующий характер, заключающийся в основном в росте температуры ГК, искривлении колонн и блоков, появлении продольных трещин в ГБ, росте количества ГБ с продольными трещинами и раскрытием трещин.

Накопление вышеуказанных дефектов приводит к изменению общей геометрии графитовой кладки: появление продольных трещин в графитовых блоках (преимущественно в центре графитовой кладки) и их раскрытие ведет к искривлению колонн ГК и развитию «бочкообразной» формы кладки в целом; вследствие аксиальной и радиальной усадки графита происходит сокращение высоты колонн. При накоплении предельного объема данных повреждений эксплуатация реактора становится невозможной.

На основании опыта эксплуатации и исследований графитовых кладок промышленных и энергетических реакторов в качестве критериев, определяющих предельное состояние графитовой кладки, были приняты:

- искривление колонн ГК, препятствующее постановке и извлечению каналов, и свободному перемещению стержней СУЗ;
- потеря несущей способности кожуха (появление трещин на наружной поверхности), вследствие прогрессирующего искривления графитовых колонн периферийного кольца.

## 1.5 Конструктивные особенности и эксплуатационные параметры реактора РБМК-1000

Активная зона РБМК представляет собой графитовую кладку цилиндрической формы, набранную из вертикальных графитовых колонн с шагом 250 мм, диаметром 11800 мм и высотой 7000 мм. Внутри графитовых колонн имеются отверстия, через которые проходят каналы. Общее число каналов, проходящих через АЗ равно:

- 1693 технологических каналов;
- 195 каналы СУЗ.

В технологических каналах располагаются тепловыделяющие кассеты, состоящие из 2-х пучков ТВЭЛ.

Графитовая кладка вместе с топливными каналами образует активную зону реактора РБМК. Кладка состоит из графитовых блоков сечением 250x250 мм и высотой 200, 300, 500 и 600 мм, образующих вместе цилиндр диаметром ~ 14 м и высотой 8 м. Графитовая кладка реактора расположена в герметичном кожухе.

Реактор оснащен двумя симметричными петлями охлаждения. К одной петле подключено 846 параллельных вертикальных каналов с ТВС, к другой петле – 847. Циркуляция теплоносителя в каждой петле обеспечивается 4 включенными параллельно главными циркуляционными насосами (ГЦН) типа ЦВН-8, из которых 3 находятся в работе и 1 – в резерве. Номинальная производительность каждого ГЦН –  $8000^{+200}$  м<sup>3</sup>/ч, развиваемый напор –  $200^{+20}$  м.ст.ж.

В качестве теплоносителя используется вода, которая в каналах нагревается до кипения. Отвод пароводяной смеси проходит через верхнюю часть канала и пароводяную коммуникацию, которая представляет собой 4 горизонтальных гравитационных сепаратора (2 в каждой петле). Среднее паросодержание составляет 14,5 %. После прохождения через сепараторы уже сухой насыщенный пар (не более 0,1 %) при давлении 7 МПа по 2 паропроводам

поступает в 2 турбины, мощность каждой турбины 500 МВт(э). Отсепарированная вода смешивается с питательной водой и по 12 опускным трубам подается во всасывающий коллектор ГЦН. Все 8 паропроводов от 4 сепараторов объединены общим кольцом высокого давления.

Теплоноситель проходит топливные каналы снизу в верх. Расход теплоносителя любого канала можно регулировать независимо при помощи индивидуального запорно-регулирующего клапана.

Реактор имеет верхнюю, нижнюю и боковую биологические защиты. Верхнюю и нижнюю биологическую защиту выполняют металлоконструкции схем «Е» и «ОР», засыпанные защитным материалом. Боковая биологическая защита – заполненные водой металлоконструкции схем «Л» и «Д».

Технологических каналы с трактами под трубопроводы подачи воды и отвода пароводяной смеси соединены с помощью сварки.

Около 95 % энергии реакции деления ядер горючего, передается теплоносителю, который омывает твэлы. Оставшиеся 5 % мощности реактора выделяется в графитовой кладке за счет процессов замедления нейтронов и поглощения гамма-квантов. Теплоноситель также получает эту часть тепловой энергии через стенку канала. С целью уменьшения термического сопротивления и избежание окисления графита, а кроме того повышения теплопередачи от графита к технологическим и специальным каналам полость кладки заполнена циркулирующей газовой смесью гелия и азота. Газовая смесь также используется для контроля целостности каналов путем измерения влажности и температуры газа. Содержание гелия в газовой смеси изменяется в пределах от 0 до 95 % в зависимости от режима работы реактора.

Для ограничения утечек гелия из внутренней полости реактора металлоконструкции схем «Е» и «ОР» и пространство, окружающее РП, заполняются азотом под давлением, превышающем давление гелиево-азотной смеси в РП на 50÷100 мм. ст. ж. Предельно-допустимое избыточное давление парогазовой смеси в реакторном пространстве – 2,18 кгс/см<sup>2</sup>.

Основные характеристики реактора РБМК-1000 (указаны значения параметров нормальной эксплуатации для уровня мощности 3200 МВт(т)) указаны в таблице 1.

Графитовая кладка реактора РБМК выполняет функции замедлителя и отражателя нейтронов, образующихся в активной зоне. В графитовом замедлителе реактора в результате рассеяния нейтронов на ядрах углерода происходит уменьшение энергии нейтронов деления до тепловой (0,025 эВ), при которой сечение деления ядер  $U^{235}$  уранового топлива достигает максимальных значений.

Таблица 1 – Основные характеристики реактора РБМК-1000

Величина	Значение	Размерность
Высота активной зоны	7000	мм
Диаметр активной зоны	11800	мм
Шаг технологической решетки	250x250	мм
Обогащение топлива по $^{235}\text{U}$	2,4/2,6/2,8	%
Мощность реактора (т)	3200	МВт
Мощность реактора (э)	1000	МВт
Расход теплоносителя через реактор	46÷48 тыс.	м <sup>3</sup> /ч
Паропроизводительность	5440÷5600	т/ч
Среднее массовое паросодержание на выходе из реактора	14,5	%
Давление пара в сепараторах	69	кгс/см <sup>2</sup>
Температура теплоносителя на входе	270	°С
Температура теплоносителя на выходе	284	°С
Расход теплоносителя в канале максимальной мощности	37,5	т/ч
Количество технологических каналов	1693	шт.
Количество каналов СУЗ	195	шт.
Средняя глубина выгорания извлекаемого топлива (для 2,8%)	30	МВт.сут/кг U
Максимальная температура графита	700	°С

Отражатель уменьшает утечку нейтронов из активной зоны (возвращая нейтроны, мигрирующие из неё), способствует выравниванию нейтронного поля активной зоны за счёт повышения плотности нейтронного потока на её периферии.

Графитовая кладка (рисунок 2) представляет собой вертикально расположенный цилиндр высотой 8 м и условным диаметром 14 м, собранный из отдельных графитовых блоков, образующих 2488 колонн, и окруженный металлическим кожухом. Плотность графита –  $1,65 \text{ г/см}^3$ . Масса кладки ~ 1760 т.

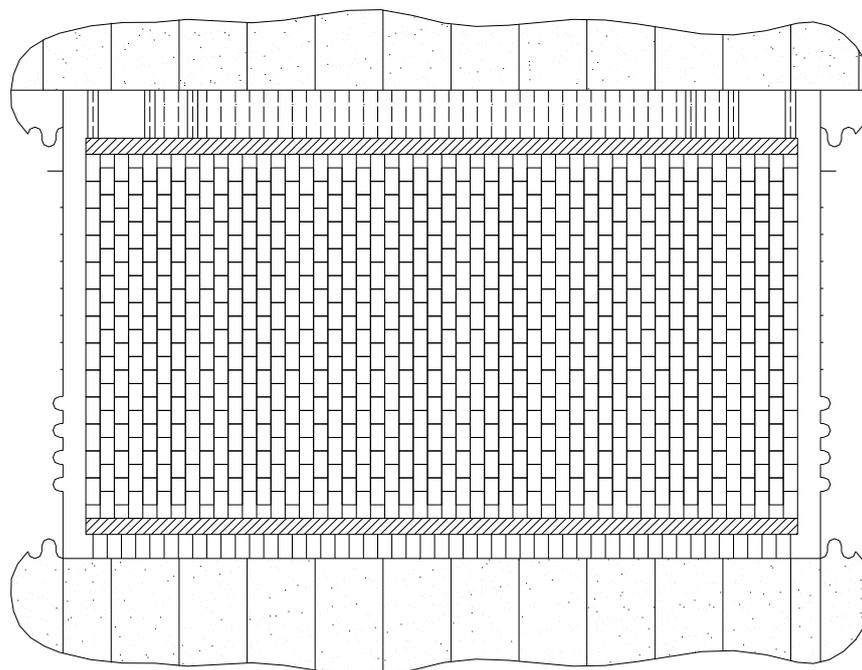


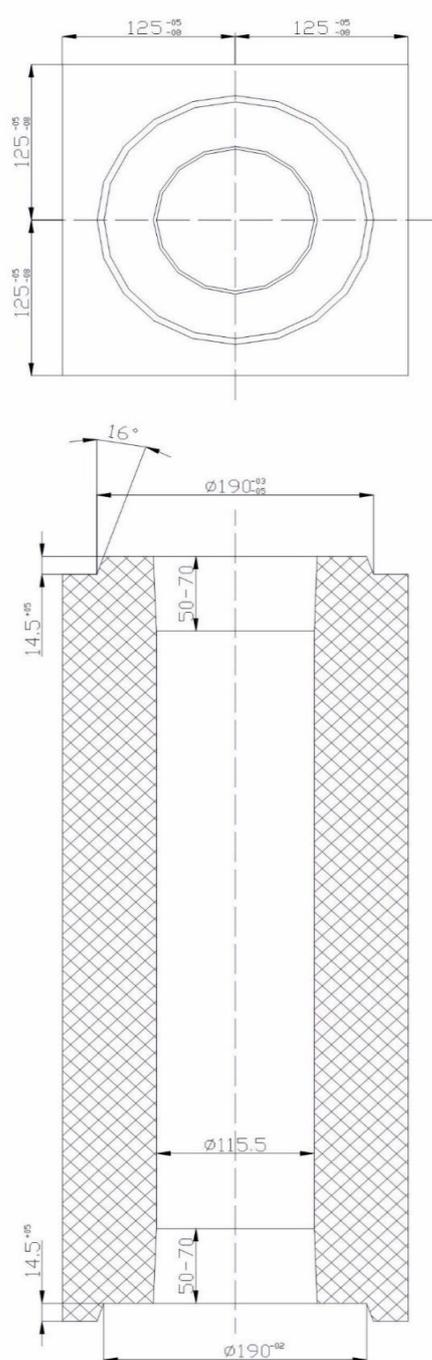
Рисунок 2 – Схема продольного разреза графитовой кладки

Графитовые колонны, состоящие из 14 блоков (рисунок 3), имеют форму параллелепипеда сечением  $250 \times 250 \text{ мм}$  и высотой 200, 300, 500, 600 мм. Основными в кладке являются блоки высотой 600 мм (во 2÷13-ом слоях), а укороченные располагаются только в торцевых отражателях в 1 и 14 слоях кладки для предотвращения взаимного совпадения стыков блоков соседних колонок.

Внутри блоков имеются отверстия для расположения 1693 технологических каналов и 195 каналов СУЗ.

Тепловыделяющие сборки (Приложение Б) предназначены для генерирования тепловой энергии и передачи её потоку теплоносителя в активной зоне реактора.

В настоящее время в качестве горючего в активной зоне РБМК используется двуокись урана, с начальным обогащением 2,4 %, 2,6 % и 2,8 %  $U^{235}$ . В работе использовалось значение обогащения равное 2,4 %. Общая загрузка активной зоны ураном составляет около 220 т.



**Рисунок 3** – Графитовый блок

Топливо в виде таблеток  $UO_2$  помещено в оболочку из сплава циркония  $Zr$  и ниобия  $Nb$  (сплав Э-110). твэлы по 18 штук собраны в виде цилиндрического пучка. Два пучка твэлов, расположенные один над другим, собранные на одном центральном стержне образуют тепловыделяющую сборку.

Тепловыделяющая сборка, закрепленная на подвеске, загружается в технологический канал. Загрузка и выгрузка сборки производятся машиной РЗМ как на работающем реакторе, так и на остановленном реакторе.

Тепловыделяющая сборка РБМК-1000 представлена в приложении Б. В каждой ТВС располагается пучок твэл (18 штук), каркаса и 18 обжимных колец, фиксирующих твэлы в концевой решетке каркаса.

Твэл состоит из оболочки, топливных таблеток, пружинного фиксатора, заглушки, и наконечника.

Материалом оболочки, заглушки и наконечника служит циркониевый сплав, содержащий 1 % ниобия (сплав Э-110). Фиксатор выполнен из циркониевого сплава Ц2М.

Наружный диаметр оболочки твэла – 13,63–0,18 мм, минимальная толщина стенки оболочки – 0,825 мм.

Топливо представляет собой таблетки из спеченной двуокиси урана  $UO_2$ . Диаметр таблетки – 11,48 $_{-0,07}$  мм, высота – 15 мм. Таблетки, которые используются в ТВС с начальным обогащением 2,4 % по  $U^{235}$ , имеют центральное отверстие 1,9 $^{+0,3}$  мм. Для уменьшения величины термического расширения топливного столба таблетки на торцах имеют лунки. Диаметральный зазор между топливом и оболочкой составляет 0,22 $\div$ 0,39 мм.

Средняя масса топлива в твэле – 3600 г, минимальная плотность таблеток – 10,4 г/см<sup>3</sup>.

Начальная среда под оболочкой твэла – гелий при давлении 0,5 МПа (5 кгс/см<sup>2</sup>). Топливный столб в твэле фиксируется пружинным фиксатором с усилием 15 кг.

Твэлы герметизируются приваркой наконечника с одного конца твэла и заглушкой с другого конца с помощью контактно-стыковой сварки (КСС-2). В таблицу 2 сведены основные характеристики ТВС

Таблица 2 – Технические данные ТВС с начальным обогащением 2,4 %

Величина	Значение	Размерность
Длина ТВС	10054	мм
Диаметр ТВС в её активной части	79	мм
Длина активной части ТВС	6854	мм
Масса ТВС в состоянии поставки	185	кг
Масса урана в ТВС	114,7	кг
Масса коррозионно-стойкой стали на длине активной части ТВС	1,7	кг
Масса циркониевых сплавов на длине активной части ТВС	40	кг
Массовая доля $^{235}\text{U}$	2	%

### **3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

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

Достижение цели обеспечивается решением задач:

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

В данной диссертационной работе приведена методика по определению ресурсоэффективности графита в уран-графитовых реакторах. Примером уран-графитового реактора послужил реактор РБМК-1000.

#### **3.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Результатом исследования является нахождение значения ресурса графита в реакторе РБМК-1000.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные отрасли научной промышленности, медицинские учреждения РФ.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данной методики. Результаты сегментирования представлены в рисунке 15.

		Методика по определению ресурса графита			
		Атомная промышленность	Научная отрасль	Медицинские учреждения	Экспортный контроль
Потребность	Сильная				
	Слабая				

Рисунок 15 – Карта сегментирования рынка услуг по определению ресурса графита

### 3.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Как уже упоминалось выше, в данной работе определена наиболее удобная методика определения ресурсоэффективности графита в уран-графитовых реакторах. Таким образом, для анализа конкурентных технических решений стоит рассмотреть методы определения ресурса графита, применяемые на практике:

- измерение ресурса графита при помощи программного обеспечения TIGRIS;
- измерение ресурса графита при помощи программного обеспечения WIMSD5.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 6. 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;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
3. Энергоэкономичность	0,04	5	3	3	0,2	0,12	0,12
4. Надежность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
5. Уровень шума	0,01	5	5	5	0,05	0,05	0,05
6. Безопасность	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
7. Потребность в материальных ресурсах	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
8. Функциональная мощность	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
9. Помехоустойчивость	0,07	5	3	3	0,35	0,21	0,21
10. Простота эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность метода	0,03	5	4	4	0,15	0,12	0,12
2. Стоимость разработки	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
4. Финансирование разработанного метода	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
Итого	1				4,96	3,86	3,66

На основании представленного выше анализа можно сделать вывод, что разработанная в данной диссертационной работе методика является наиболее оптимальной для использования в практических целях. Конкурентные методы определения ресурса графита достаточно уязвимы, в силу отсутствия конкретного алгоритма действий, способного уменьшить погрешность измерительного процесса. В свою очередь разработанный метод позволяет получить результаты с минимальным значением погрешности.

### **3.1.2 SWOT-анализ**

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

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

Таблица 7 – Интерактивная матрица проекта

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

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

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 8.

Таблица 8 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Актуальность выбранной темы.</p> <p>С2. Современная технология.</p> <p>С3. Возможность контроля процесса расчета.</p> <p>С4. Наличие актуальных данных по реакторной установке РБМК-1000</p> <p>С5. Полный анализ нейтронно-физических параметров.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Наличие человеческого фактора.</p> <p>Сл2. Возможность появления погрешности расчета.</p> <p>Сл3. Продолжительное время расчетов.</p> <p>Сл4. Высокий уровень знаний для выполнения расчетов.</p> <p>Сл5. Ограниченное число рассчитываемых параметров.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование расчетов для ОКБ.</p> <p>В2. Актуальность темы для публикации в научных журналах.</p> <p>В3. Применение расчета в новых перспективных реакторных установках</p> <p>В4. Дополнительный спрос на результаты расчетов.</p>	<p>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>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Возникновение ошибок из-за длительных расчетов; Данный фактор при внимательной работе можно устранить.</p> <p>2. Требование наличия обширных знаний в тематике реакторного графита; Данный не является большим недостатком, так как получение дополнительных знаний не принесет вреда и расширит кругозор.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Недостаточная точность аналитических методов.</p> <p>У2. Низкий спрос на результаты при отсутствии публикаций.</p> <p>У3. Отсутствие источников для проверки полученных результатов.</p> <p>У4. Падение интереса государства к уран-графитовым реакторам.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</p> <p>1. Несмотря на научную новизну со стороны государства, проектирование уран-графитовых реакторов может быть приостановлено; Тяжелая финансовая ситуация в стране может повлиять на отказ страны строить уран-графитовые реактора. Но в 2016 году финансовое состояние в стране стабильное и в планах правительства нет отказа от реакторов данного типа.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</p> <p>1. Влияние человеческого фактора может негативно сказаться на достоверность результатов, что приведет к падению шанса на публикацию. Однако при комплексной работе можно минимизировать появление ошибки.</p>

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества разработанной методики измерений значительно преобладают над её недостатками. Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

### 3.2 Планирование управления научно-техническим проектом

#### 3.2.1 Иерархическая структура работ проекта

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

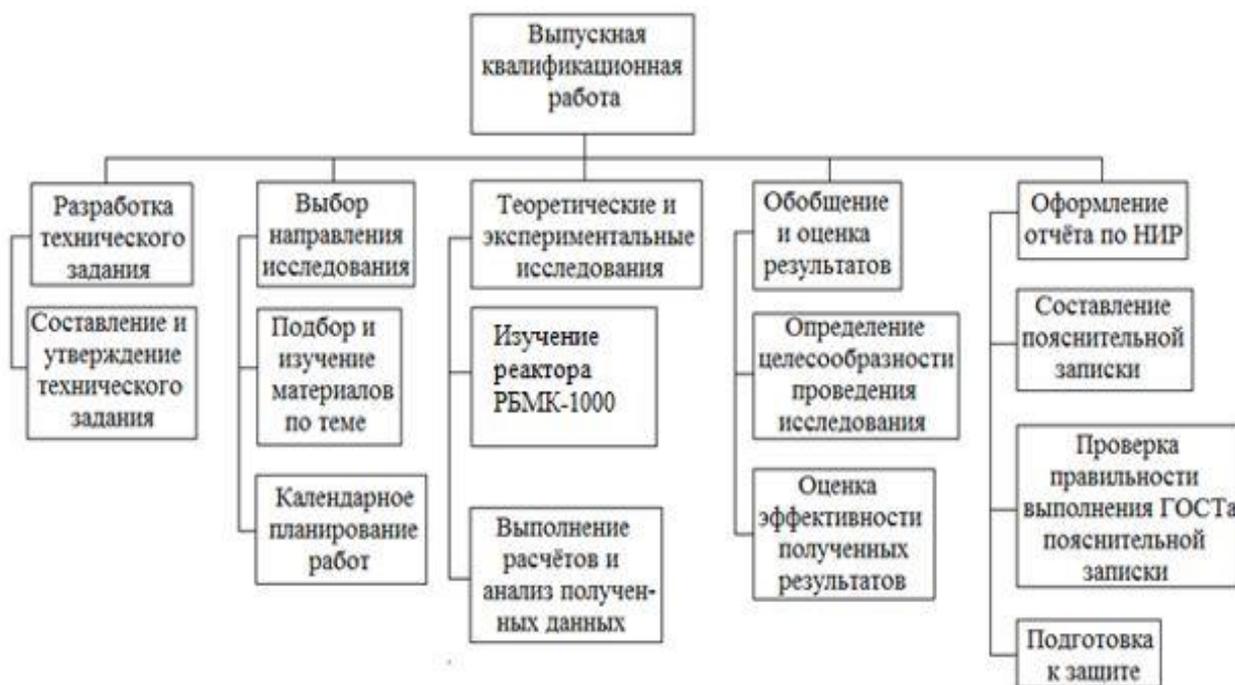


Рисунок 16 – Иерархическая структура работ

#### 3.2.2 Контрольные события проекта

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

Таблица 9 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2016	Приказ по ФТИ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2016	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2016	
4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2016	Отчёт
5	Календарное планирование работ	12.02.2016	План работ
6	Изучение эксплуатационных параметров РБМК-1000	13.02.2016	Отчёт
7	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	28.03.2016	Отчёт
8	Обобщение и оценка результатов	30.03.2016	Отчёт
9	Составление пояснительной записки	14.02.2016- 25.04.2016	Пояснительная записка
10	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2016	
11	Подготовка к защите	27.04.2016- 25.05.2016	

### 3.2.3 План проекта

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

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

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

Линейный график представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	3	1.02.2016	3.02.2016	Руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	2	3.02.2016	5.02.2016	Руководитель
3	Выбор направления исследований	10	5.02.2016	10.02.2016	Руководитель, студент
4	Подбор и изучение материалов по теме	30	10.02.2016	12.02.2016	Студент
5	Календарное планирование работ	2	12.02.2016	13.02.2016	Руководитель, студент
6	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	45	28.03.2016	30.03.2016	Студент
7	Обобщение и оценка результатов	3	30.03.2016	30.03.2016	Руководитель, студент
8	Составление пояснительной записки	82	14.02.2016	25.04.2016	Студент
9	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	3	26.04.2016	27.04.2016	Руководитель, студент
10	Подготовка к защите	29	27.04.2016	25.05.2016	Студент

В таблице 11 представлен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 11 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Разработка технического задания	Руководитель	3	▨															
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2	▨															
3	Выбор направления исследований	Руководитель, студент	10	▨	■														
4	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	30		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	Календарное планирование работ	Руководитель, студент	2	▨	■														
6	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	Студент	45			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, студент	3													▨	■		
8	Составление пояснительной записки	Студент	82			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
9	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент	3													▨	■		
10	Подготовка к защите	Студент	29													■	■	■	■

▨ – Руководитель, ■ – Студент

### 3.3 Бюджет научного исследования

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

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

#### 3.3.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

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

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, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 12.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 2,05 \cdot 0,065 \cdot 1000 = 133,25,$$

где  $C_{\text{эл}}$  – тариф на промышленную электроэнергию (2,05 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

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

Затраты на электроэнергию составили 133,25 рубля.

Таблица 12 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электричество	–	65 кВт·ч	2,93	190,45
Бумага	SvetoCopy	500 листов	2,3	220
Печать на листе А4	–	460	1,5	690
Ручка	Pilot BPS-GP	3	50	150
Доступ в интернет	–	4 месяца	350	1400
Всего за материалы				2593,25
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого по статье $C_m$				2650,45

### 3.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ)

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по конкретной теме.

В данной исследовательской работе к спецоборудованию, необходимому для проведения экспериментальных работ, относится ПЭВМ.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{аморт}} = C_{\text{об}} / T, \quad (3)$$

где  $C_{\text{об}}$  – стоимость оборудования (руб);

$T$  – срок службы (дней).

$$C_{\text{аморт}} = (57800 / 1100) = 52,55 \text{ руб/дн.}$$

Оборудование использовалось в течение 87 дней, таким образом, затраты на оборудование:

$$C_{\text{аморт(общ)}} = 52,55 \cdot 87 = 4571,85 \text{ руб.}$$

### 3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

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

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

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

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

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

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

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 13).

Таблица 13 – Баланс рабочего времени

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

Студент во время прохождения преддипломной практики получает стипендию, равную 5850 руб/месяц. Среднедневная стипендия (оплата) составляет:

$$З_{\text{дн}} = (5850 \cdot 11,2) / 223 = 293,8 \text{ руб/день.}$$

Основной заработок студента за время преддипломной практики составляет:

$$З_{\text{осн}} = 293,8 \cdot 45 = 13221 \text{ руб.}$$

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

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

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

– иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью доцент. Оклад доцента составляет 23264,86 рубля.

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

Основная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 23264,86 \cdot 1,3 + 10000 = 40244,3 \text{ руб/месяц.}$$

Среднедневная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = (40244,3 \cdot 10,4) / 251 = 1667,5 \text{ руб/день.}$$

### 3.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

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

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

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

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

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

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

Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Заработная плата, руб.	Руководитель	Студент
Основная зарплата	40244,3	13221
Дополнительная зарплата	6036,6	1322,1
Зарплата исполнителя	46280,9	14543,1
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	60824	

### 3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 27,1 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$C_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (40244,3 + 6036,6) = 12542,12 \text{ руб.}$$

### 3.3.6 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 др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

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

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

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Примем  $k_{\text{накл}} = 30 \%$ .

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (40244,3 + 6036,6) = 13884,27 \text{ руб.}$$

### 3.3.7 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

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 15.

Таблица 15 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	2650,45
2. Затраты на спецоборудование	4571,85
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	53465,30
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	7358,70
4. Отчисления во внебюджетные фонды	12542,12
5. Накладные расходы	13884,27
Бюджет затрат исследования	94472,69

### 3.4 Организационная структура проекта

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

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



Рисунок 17 – Организационная структура научного проекта

### 3.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 16.

Таблица 16 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соцответственность»	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

Продолжение таблицы 16

Выполнение расчётов и анализ полученных данных	О				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

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

### **3.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более)

вариантов исполнения научного исследования (см. табл. 2.6). 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:

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

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

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

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

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

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{финр}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{max}} = \frac{138080,9}{138080,9} = 1;$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{финал}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{145500,2}{138080,9} = 1,05; \quad I_{финал}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{161260,3}{138080,9} = 1,16;$$

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

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

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

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности представлен ниже.

Таблица 17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

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

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

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

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

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

В результате:

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

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

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

Результат вычисления сравнительной эффективности проекта и сравнительная эффективность анализа представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Сравнительная эффективность разработки

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

Таким образом, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над аналогами.

## Список публикаций студента

1. Определение скорости накопления запасенной энергии Вигнера в графитовом замедлителе/ А.М. Мочалов, А.Г. Наймушин, В.Н. Нестеров, Д.К. Пугачев. – Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015 – № 4. – С. 101-110.

2. Пугачев Д.К., Мочалов А.М., Куликов М.Г. Скорость накопления энергии Вигнера в реакторном графите марки ГР-280 при его эксплуатации в реакторе АДЭ [Электронный ресурс]: сборник тезисов докладов VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири, Томск, 14-16 октября 2015. –Томск: ТПУ, с. 101. Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C63/C63.pdf>