

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Отработка процесса получения модельных топливных таблеток</b>

УДК 621.039.54:661.666-026.771

#### Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Цветков А.Д.		

#### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

#### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Е.С.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	к.т.н.		

#### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н.		

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
<b>Универсальные</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные</b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения
ПК(У)-2	Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии
ПК(У)-3	Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов
ПК(У)-4	Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах
ПК(У)-5	Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета
ПК(У)-6	Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-7	Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов
ПК(У)-8	Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-9	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-10	Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии



Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение:	Киселева Е.С.
Социальная ответственность	Тимченко С.Н.
Иностранный язык	Шайкина О.И.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:</b>	
Обзор литературы	
Основная часть	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	
Социальная ответственность	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	22.01.2021
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Цветков Алексей Дмитриевич		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0AM91	Цветкову Алексею Дмитриевичу

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НТИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска; Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>30% премии; 20% надбавки; 16% накладные расходы; 30% районный коэффициент</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2%.</i>

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>1. Потенциальные потребители результатов исследования; 2. Анализ конкурентных технических решений; 3. SWOT – анализ.</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>1. Цели и результаты проекта. 2. Организационная структура проекта. 3. Ограничения и допущения проекта.</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>1. Структура работ в рамках научного исследования; 2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; 3. Расчет бюджета научно-технического исследования (НТИ)</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>1. Определение интегрального финансового показателя разработки; 2. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3. Определение интегрального показателя эффективности.</i>

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

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. «Портрет» потребителя результатов НТИ</li> <li>2. Сегментирование рынка</li> <li>3. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>4. Матрица SWOT</li> <li>5. Диаграмма Гантта</li> <li>6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</li> </ol>
--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0AM91	Цветков Алексей Дмитриевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM91	Цветкову Алексею Дмитриевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

Отработка процесса получения модельных топливных таблеток

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p><i>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</i></p>	<p>Исследование влияния параметров процессов изготовления пресс-порошка, прессования и обжига на свойства получаемых модельных топливных таблеток на основе углеродной матрицы; Область применения – ядерная энергетика.</p>
--	--

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

<p><i>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации;</li> <li>– СанПиН 1.2.3685-21;</li> <li>– ГОСТ 12.1.038-82;</li> <li>– ГОСТ Р 12.1.004-91;</li> <li>– ГОСТ 31733-2012;</li> <li>– ГОСТ Р 53682-2009;</li> <li>– ГОСТ 12.1.007-76;</li> <li>– Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.</li> </ul>
<p><i>2. Производственная безопасность:</i></p> <p><i>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов.</i></p> <p><i>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Повышенный уровень электромагнитного излучения;</li> <li>– Недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– Превышение уровня шума;</li> <li>– Отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– Поражение электрическим током;</li> <li>– Поражение внутренних органов;</li> <li>– Механическая опасность;</li> <li>– Получение ожогов.</li> </ul>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Наиболее вероятная аварийная ситуация на рабочем месте – пожар;</li> <li>– Также возможны: аварии с электрооборудованием и обнаружение предмета, похожего на взрывное устройство.</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	к. т. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Цветков Алексей Дмитриевич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
 Уровень образования магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла  
 Период выполнения (весенний семестр 2020 /2021 учебного года)

Форма представления работы:

<b>Магистерская диссертация</b>
---------------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	12.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.01.2021	Выдача задания	
26.02.2021	Изучение материалов по теме	
9.03.2021	Анализ исходных параметров	
18.03.2021	Выбор метода выполнения исследования	
15.04.2021	Изготовление модельных топливных таблеток	
18.05.2021	Анализ полученных образцов	
27.05.2021	Написание ВКР	
31.05.2021	Сдача работы	

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 104 страницы, 16 рисунков, 45 таблиц, 20 источников, 11 формул.

Ключевые слова: технический углерод, стеарат натрия, дисперсионное ядерное топливо, оксид церия, оксид неодима, оксид самария, прессование, таблетирование.

Отработка процесса формования порошков с целью получения модельных топливных таблеток с заданными свойствами плотности и прочности является актуальной проблемой в области разработки дисперсионного ядерного топлива.

Объектом исследования являются углерод, оксид церия, оксид неодима, оксид самария, стеарат натрия, порошки, получаемые путем смешения углерода оксидов и стеаратов, таблетки, получаемые путем прессования порошков с их дальнейшим нагревом.

Цель работы: отработать процесс получения топливных таблеток с углеродной матрицей на оксидах-имитаторах и провести анализ полученных результатов.

Структура работы: выпускная квалификационная работа состоит из четырех частей. В первой части проведен анализ свойств дисперсионного ядерного топлива, используемого в высокотемпературных реакторах; определен состав топливных композиций; проведен сравнительный анализ свойств оксидов, используемых в качестве делящегося материала и оксидов-имитаторов.

Во второй – представлено описание подготовки пресс-порошков, а также условия фабрикации и свойства полученных таблеток.

В третьей части приведен экономический расчет затрат на проведение исследования, составлен календарный план работы.

В четвертой – рассмотрена охрана труда и техника безопасности при проведении научно-исследовательской работы.

## Оглавление

Введение.....	11
1 Обзор литературы .....	13
1.1 Дисперсионное ядерное топливо.....	13
1.2 Особенности реакторов ВТГР.....	15
1.3 Микротвэлы ВТГР.....	16
1.4 Покрытия в микротвэлах.....	20
1.5 Типы дисперсионного топлива.....	22
1.6 Топливо в высокотемпературной газоохлаждаемой ториевой реакторной установке.....	25
1.7 Имитаторы делящихся материалов.....	27
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 31	
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	31
3.2 Анализ конкурентных технических решений.....	32
3.3 SWOT-анализ.....	34
3.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	36
3.5 Инициация проекта .....	38
3.6 Планирование управления научно-исследовательского проекта .....	40
3.7 Бюджет научного исследования .....	43
3.8 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	46
Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	48
4 Социальная ответственность .....	50
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	50
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния.....	53
4.2.1 Организационные мероприятия.....	53
4.2.2 Организация рабочего места оператора ПЭВМ.....	53
4.3 Безопасность при работе с вредными веществами.....	55

4.4 Электробезопасность .....	56
4.5 Условия безопасной работы.....	58
4.6 Пожарная безопасность .....	60
4.7 Термическая безопасность при работе с трубчатой печью .....	62
4.8 Требования безопасности во время работы с гидравлическим прессом...	63
Заключение .....	65
Список публикаций.....	66
Список использованных источников .....	67
Приложение А .....	70

## **Введение**

Одной из приоритетных задач настоящего времени в области ядерной энергетики является увеличение производства электроэнергии. Используемое в большинстве ядерных реакторов керамическое топливо обладает низкой теплопроводностью, вследствие чего при тепловых нагрузках температура в центре твэла близка к температуре плавления топлива. Переход к другому типу топлива, которое имеет большую теплопроводность, позволит сохранить работоспособность твэлов при высокой температуре и длительном облучении, что способствует увеличению глубины выгорания.

Перспективным в этом случае становится использование дисперсионного топлива, которое характеризуется высокими показателями теплопроводности за счет материала матрицы. Кроме того, дисперсионное топливо обладает высокой радиационной стойкостью при глубоком выгорании. Осколки деления не выходят за пределы матрицы и локализуются на небольших участках вокруг топливных частиц.

Материалами матрицы, в которую диспергированы топливные частицы, могут выступать металлы, сплавы, а также неметаллы, в частности, графит. При этом необходимо учитывать, что матрица и топливо не должны вступать в физико-химические взаимодействия.

Сведений о производстве дисперсионного ядерного топлива крайне мало. В связи с этим отработка технологии получения модельных топливных таблеток является актуальной задачей.

Целью работы является отработать процесс получения топливных таблеток с углеродной матрицей на оксидах-имитаторах и провести анализ полученных результатов.

В соответствии с поставленной целью, необходимо было решить следующие задачи:

1. провести анализ свойств дисперсионного топлива, используемого в современных высокотемпературных реакторах;

2. определить модельные оксиды и составы топливных композиций;
3. изготовить таблетки из пресс-порошков различного состава и провести анализ полученных таблеток;
4. провести расчет экономических затрат и анализ социальных факторов.

## **1 Обзор литературы**

### **1.1 Дисперсионное ядерное топливо**

Процесс деления ядер тяжелых элементов осуществляется в топливном сердечнике. Твэлы могут быть с однородными или с дисперсионными топливными сердечниками в зависимости от структуры топлива. Однородные сердечники разделяют на два типа: металлические, которые представлены ураном, плутонием, торием и их сплавами и керамические, представленные в свою очередь нитридами, карбидами, окислами и другими соединениями урана, тория, плутония. Дисперсионные топливные сердечники состоят из частиц делящегося вещества, которые распределены в матрице из неделящихся материалов (графита, керамики, металлов). Дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) имеет высокие показатели по радиационной стойкости при глубоком выгорании, что является его главным преимуществом [1].

Характерными особенностями твэлов дисперсионного типа являются прочность, сопоставимая с прочностью керамического топлива, уникальные ядерно-физические, а также противокоррозионные свойства. При этом теплопроводность и пластичность зависят от материала матрицы. Топливные частицы, окруженные матрицей, подвержены делению, которое сопровождается повреждениями. Продукты деления оказывают воздействие на часть матрицы, находящуюся в непосредственной близости с ядерным топливом.

Теплообмен между топливными частицами и оболочкой может быть достаточно надежным при условии хорошей теплопроводности матрицы. Температура в центре таблетки в таком случае будет значительно уменьшаться, что позволяет эксплуатировать твэлы в маневренных режимах успешнее и делает их более безопасными в аварийных ситуациях. При этом в случае разгерметизации твэла теплоноситель будет контактировать с ядерным топливом только в месте дефекта, благодаря чему снижается степень загрязнения.

В случае использования урана в качестве делящегося материала ДЯТ появляется необходимость высокого обогащения (до 96 %  $^{235}\text{U}$ ), так как неделящиеся ядра в топливе поглощают нейтроны впустую. Следовательно, стоимость изготовления такого топлива будет высокой, что является основным недостатком ДЯТ. Стабильность размеров ДЯТ, значимая для достижения больших глубин выгорания, определяется многими факторами, в частности структурой, природой, свойствами, совместимостью и радиационной стойкостью частиц топлива и материалов, используемых в качестве матрицы, конструкцией твэлов и условиях их работы. Относительно малое удельное содержание делящегося материала в объеме сердечника также выступает существенным недостатком.

Топливные частицы в дисперсионных твэлах заключены в защитные оболочки. Такие пленки способствуют увеличению стойкости сердечников, так как осколки деления остаются в относительно малом объеме рядом с топливными частицами. Равномерное распределение частиц в материале матрицы также достигается посредством нанесения защитных пленок. Покрывают на топливные частицы наносят различными методами. Наиболее используем на современных предприятиях метод химического осаждения из газовой фазы.

Для изготовления твэлов высокотемпературного газоохлаждаемого реактора используют частицы дикарбида урана и тория с углеродным покрытием, диспергированные в графитовой матрице. Исходными газами для осаждения углерода газозофазными методами являются: метан, ацетилен, пропан и природный газ. Процесс нанесения покрытия обычно проводят при температуре от 1400 °С и выше. Пропан, метан и природный газ применяются для осаждения углерода газозофазными методами. Температура, при которой наносят покрытия обычно составляет от 1400 °С и выше.

## 1.2 Особенности реакторов ВТГР

ДЯТ в матрице из графита в основном используется в активной зоне ВТГР. Реакторы такого типа отличаются эффективным удержанием в топливной композиции продуктов деления в аварийных ситуациях.

С конца 1950 г. было разработано несколько видов ДЯТ для реакторов ВТГР. Наибольшее распространение получили два типа:  $UO_2$  в замедлителе из  $BeO$  и  $UO_2$  или  $UC_2$  в графите. Из-за плохого поведения  $BeO$  при облучении в качестве матричного материала был выбран графит [2, 3].

У дисперсионного топлива ректора ВТГР имеется два уровня гетерогенности: микроскопический уровень, который связан с микротвэлами, а также макроскопический – связанный с топливными элементами.

ВТГР применяют в ядерной энергетике и используют для теплоснабжения промышленных производств в силу следующих особенностей [4, 5]:

- присущей только ВТГР возможности нагрева теплоносителя на выходе из активной зоны до  $1000\text{ }^{\circ}C$  и снабжения промышленности высокотемпературным теплом вместо сжигания органического топлива;
- высоком уровне безопасности, позволяющем размещать такие установки в непосредственной близости от жилых массивов и предприятий, что важно с точки зрения снижения потерь при транспортировке тепла, особенно с высокой температурой.

Основная удельная мощность активной зоны ВТГР достаточно низкая, так как активная зона большая по размеру. Благодаря большому объему графита реактор с такой низкой удельной мощностью может вместить пассивный отвод тепла от распада из активной зоны без радиоактивного выброса. Покрытые частицы топлива должны оставаться нетронутыми при переходных процессах, таких как протечки или потеря теплоносителя, что является очень важной задачей. При этом аварийный температурный предел топлива, который обычно составляет  $1600\text{ }^{\circ}C$ , не должен быть превышен в

течении короткого периода времени. Если наивысшая нормальная рабочая температура топлива не превышает 1250 °С, частота отказов топлива очень низкая, а при более высоких температурах стремительно возрастает. Но в целом, аварийная производительность топлива зависит от изменения температуры, длительности работы, выгорания, качества изготовления, и должна быть рассчитана с помощью специальных экспериментов топлива на облучение, а затем протестирована в аварийной симуляции вне реактора.

В таблице 1.1 приведены основные характеристики проектов реакторных установок с ВТГР, которые разрабатывались в РФ.

Таблица 1.1 – Основные характеристики реакторных установок ВТГР РФ

Характеристики	ВГР-50	ВГ-400	ВГ-400ГТ	ВГМ	ВГМ-П	ГТ-МГР
	Назначение					
	Выработка электроэнергии плюс					
	радиационное облучен.	тепло для производства аммиака	бытовое теплоснабжение	тепло для технологических процессов	тепло для нефтепереработки	-
	Компоновка реактора					
	Модульная	Интегральная		Модульная		
Тепловая мощность, МВт	136	1060	1060	200	215	600
Число петель	1	4	4	1	1	1
Электрическая мощность, МВт	50	300	400	50	-	290
Температура гелия, °С:						
на входе в АЗ	296	350	350	300	300	490
на выходе из АЗ	810	950	950	750...950	750	850
Давление гелия, МПа	4	5	5	5	6	7
Тип АЗ	Шаровые твэлы					Призматические блоки

### 1.3 Микротвэлы ВТГР

Дисперсионные твэлы эксплуатируемые на реакторах ВТГР по своей конструкции бывают блочными или шаровыми. Микро топливо в блочных конструкциях распределено в брикетах цилиндрической формы, которые

объединены в призматические твэлы. Перегрузку топлива в таком случае можно проводить только на остановленном реакторе.

Шаровые уран-графитовые твэлы, содержащие топливо в виде микротвэлов, используются в газоохлаждаемых реакторах ВГР-50 и ВГ-400, активная зона которых состоит из свободной засыпки [6, 7]. Микротвэл (МТ) – это шарообразная частица ядерного топлива, также называемая керном, покрытая барьерными слоями, предотвращающими выход продуктов деления за пределы МТ. Несмотря на то, что данный вид топлива считается основным для ВТГР, возможно также его использование на реакторах других типов. Выбор параметров и технология изготовления МТ влияет на то, насколько эффективно удерживаются в твэле продукты деления. На рисунке 1.1 представлена структура шаровых МТ.

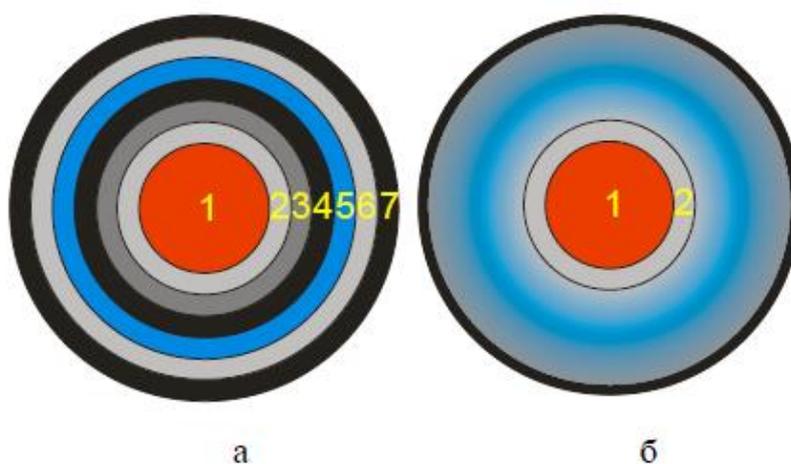


Рисунок 1.1 – Структура шаровых МТ: а – с многослойным покрытием, б – непрерывной конструкции; 1 – керн, 500 мкм:  $UO_2$ ,  $UO_2-Al_2O_3-SiO_2$ , UN, UCN,  $ThO_2$ ,  $(UTh)O_2$  и др.; 2 –  $PuC$  буферный,  $1,1 \text{ г/см}^3$ , 28...50 мкм; 3 –  $PuC$  переходной,  $1,5 \text{ г/см}^3$ , 14...50 мкм; 4 –  $PuC$  плотный,  $1,8...1,9 \text{ г/см}^3$ , 60 мкм; 5 –  $SiC$ ,  $3,2 \text{ г/см}^3$ , 80 мкм; 6 –  $PuC$  буферный,  $1,1 \text{ г/см}^3$ , 3...10 мкм; 7 –  $PuC$  плотный,  $1,8...1,9 \text{ г/см}^3$ , 35...100 мкм (а); комбинированные ( $PuC+SiC$ ) покрытия (б)

В качестве топливной композиции в данной конструкции МТ применяют микросферы  $UO_2$  с плотностью от  $10 \text{ г/см}^3$  и более, коэффициентом несимметричности меньше 1,05.

Топливный сердечник находится внутри шарового твэла диаметром 60 мм. МТ, содержащиеся в топливном сердечнике, распределены в матрице из графита. В твэлах для ВГР-50 и ВГ-400 содержится  $^{235}U$  в количестве 0,5 г и 0,4 г соответственно. В зависимости от требуемой загрузки урана и размеров сердечника объемное заполнение сердечников МТ составляет от 4% до 15% [6-8].

Шаровые твэлы изготавливают путем смешивания МТ с композицией матрицы на основе порошка реакторного графита и каменноугольного пека. На следующем этапе сердечник прессуют при давлении до 10 МПа. Далее на сердечник при давлении 30 МПа напрессовывают оболочку из матрицы того же материала без топлива по двусторонней схеме. Затем проводят термообработку от  $1200^\circ\text{C}$  до  $2000^\circ\text{C}$ .

Шаровой твэл, в котором топливо располагается в сферическом слое, дает снижение максимальной температуры в твэле при эксплуатации примерно на  $150^\circ\text{C}$ . Матричный графит определяет прочностные и теплофизические свойства твэла, так как объемное заполнение сердечника МТ довольно низкое.

В технологии изготовления шаровых твэлов можно выделить три основных этапа [9, 10]:

- получение топливных микросфер;
- получение МТ;
- изготовление шаровых твэлов.

Топливные микросферы получают методом, разработанным ННЦ ХФТИ. Суть метода заключается в механическом преобразовании топливных заготовок, изготовленных на основе пластифицированных масс, в сферы путем обкатывания цилиндрических заготовок.

Полученные микросферы подвергаются термообработке, которую проводят в два этапа. Вакуумный отжиг, который производится на первом

этапе, необходим для удаления пластификатора при температуре 300°C. Второй этап проводится при температуре от 1450°C до 2000°C для спекания топливных микросфер в инертном газе или вакууме.

В методике ННЦ ХФТИ вместо внутреннего и внешнего плотных пироуглеродных слоев (PyC) используются комбинированные (PyC+SiC) покрытия с плотностью  $\geq 2,4$  г/см<sup>3</sup> (рисунок 1.1 б). Замена покрытий в данном случае осуществляется по причине снижения выхода из МТ твердых и газообразных продуктов деления в 100 раз. При этом толщина буферного слоя уменьшается почти в 2 раза благодаря комбинированному защитному слою.

Следует отметить, что существующие технологии изготовления шаровых твэлов за рубежом базируются на использовании процессов прессования. Защитные покрытия МТ подверженные высокому давлению в процессе прессования заготовок разрушаются, из-за чего удержание продуктов деления снижается. Указанные недостатки устраняются с помощью разработанной технологии получения твэлов способом связывания пироуглеродом графитовых композиций.

Технология изготовления шаровых твэлов с помощью метода объемного газофазного насыщения пироуглеродом пористых заготовок включает в себя следующие операции: приготовление графитового порошка требуемого гранулометрического состава; приготовление пресс-шихты для оболочек шаровых элементов; приготовление топливной массы для сердечников; формовку заготовок топливного сердечника; заготовку твэла; связывание заготовок твэла пироуглеродом; механическую обработку шаровых твэлов; термообработку и контроль изделия.

Порошок графита и МТ с покрытиями из пироуглерода и карбида кремния являются основными исходными материалами для твэлов на пироуглеродной связке. Для приготовления пресс-шихты графитовый порошок смешивают с пластификатором, чтобы в дальнейшем получить оболочки шаровых элементов. Исходный материал для формирования сердечников

ТВЭЛов получают после введения в пресс-шихту нужного количества МТ и тщательного перемешивания смеси.

Заготовки оболочек и сердечников шаровых элементов в сборе формуется в стальных пресс-формах. Операция формовки заготовок до сравнительно низкой плотности с последующим связыванием пироуглеродом до плотности  $1,75...1,90 \text{ г/см}^3$ , а также связывание заготовок шаровых элементов пироуглеродом проводятся в специальной форме, которую размещают в установке пиролиза. Процесс пиролиза проводится в потоке природного газа при  $900...1100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Длительность процесса пиролиза до плотности  $1,75 \text{ г/см}^3$  составляет  $\sim 70$  ч. В качестве матричного графита для шаровых ТВЭЛов ННЦ ХФТИ использовал графит, связанный пироуглеродом (ГСП).

#### **1.4 Покрытия в микротвэлах**

Покрытия в МТ решают сразу несколько важных задач: предотвращают выход продуктов деления в теплоноситель, защищают керн от воздействия теплоносителя, повышают механическую прочность МТ в целом, уменьшают диффузию и миграцию топлива при высоких температурах, защищают матрицу дисперсных композиций от радиационных повреждений продуктами деления, предохраняют топливо от контакта с воздухом и влагой при технологических операциях и способствуют более равномерному распределению топлива в матрице.

МТ с двумя оболочками из  $\text{PyC}$  получили название BISO-МТ (Bistructural ISOtropic – двух структурное изотропное), а с трехслойными оболочками из  $\text{PyC}$  и  $\text{SiC}$  – TRISO-МТ (TRistructural-ISOtropic – трех структурное изотропное). Для топлива типа BISO температура топлива не должна превышать  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Каждый слой покрытия выполняет определенную функцию:

- ВРyC – пористый буферный слой создает объем, в котором собираются ГПД и CO/CO<sub>2</sub>, защищает IPyC слой от прямого воздействия «горячих» осколков деления, α и β-излучений;

- IPyC слой – прежде всего защищает керн от хлористого водорода при нанесении SiC покрытия, снижает возможное повреждение SiC продуктами деления и CO/CO<sub>2</sub> при эксплуатации;

- SiC слой – является основным силовым слоем, удерживающим ГПД и ТПД, сохраняет большую часть своих свойств при высоких температурах;

- OPyC слой – обеспечивает защиту хрупкого SiC слоя от повреждений при производстве топлива.

При более высоких температурах некоторые продукты деления (например, цезий) мигрируют через слой в графит матрицы и далее в теплоноситель. Чтобы устранить этот недостаток, было разработано топливо типа TRISO с дополнительным слоем из SiC. Температура топлива типа TRISO может достигать 1500 °C. Важной особенностью МТ в условиях нейтронного облучения является способность снижать выход продуктов деления в теплоноситель [11].

Основные требования к свойствам материалов оболочки для трех структурного изотропного топлива следующие:

Слой PyC:

- должен быть непроницаем для C<sub>2</sub> (для достижения ядра) и CO (для достижения SiC);

- иметь изотропную текстуру;

- осаждаться при достаточно низкой температуре, чтобы избежать загрязнения U и Th.

Внутренний слой пироуглерода:

- удерживать газообразные продукты деления;

- обеспечивать диффузионный барьер для металлических продуктов деления;

- действовать, как механическая подложка для осаждения SiC

Наружный слой пироуглерода:

- удерживать газообразные продукты деления;
- создать сжимающее напряжение на SiC при облучении (усадка);
- обеспечить связующий слой с матрицей.

Слой SiC:

- должен иметь бета модификацию SiC с кристаллической структурой, которая образуется при температурах ниже 1700 °С;
- иметь близкую к теоретической плотность, выше 3,19 г/см<sup>3</sup>;
- иметь равно осную микроструктуру, мелкие зерна и несколько дефектов;
- стык PyC-SiC должен обладать достаточной прочностью.
- представлять основной барьер для продуктов деления;
- удерживать все газообразные и твердые продукты деления;
- действовать в качестве несущего слоя.

Буферный слой:

- должен обеспечить свободный объем для локализации делящихся газов и CO;
- компенсировать увеличение объема топливного ядра вследствие термического расширения и радиационного распухания.

## **1.5 Типы дисперсионного топлива**

В ВТГР имеется возможность варьирования загрузки тяжелых элементов и обогащения свежего топлива при заданной средней энергонапряженности и фиксированных геометрических размерах активной зоны, что свидетельствует о «гибкости» физических характеристик реакторов такого типа. Это свойство позволяет начать работу реактора на одном топливе, а затем перейти на другой тип загрузки активной зоны. При переводе реактора на другой топливный цикл требуется решение следующих основных вопросов:

а) обеспечение ядерной безопасности штатными органами компенсации реактивности в переходном периоде и для нового равновесного режима выгорания, обеспечение контролируемости реактора;

б) исследование влияния загрузки нового топлива на работоспособность прежнего топлива, находящегося в реакторе;

в) исследование изменения температурного режима топлива и стержневой системы управления и защиты реактора (СУЗ);

г) исследование изменения условий эксплуатации конструкционного графита;

д) исследование изменения выхода продуктов деления и радиационной обстановки в первом контуре.

Таким образом, возможность перевода реактора на новый топливный цикл должна быть исследована и обоснована еще на стадии проектирования. Такой перевод требует реализации различных мер по созданию определенных запасов по эффективности органов компенсации реактивности, обоснованию сроков службы конструкционного графита и т.д.

Проведен сравнительный анализ нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора типа ГТ-МГР с разными видами топлива (урановое, уран-ториевое, на основе реакторного плутония, чистого плутония и МОХ-топлива), изготавливаемого по микротвэльной технологии с диаметрами ядер 200 мкм или 500 мкм в топливных компактах. Сравнение вариантов проводилось по следующим характеристикам: эффекты реактивности (температурный и отравление, запас реактивности на выгорание), эффективность стержневой системы компенсации реактивности, максимальный коэффициент неравномерности энергораспределения. Значения исходных параметров топлива и результаты расчета топливных циклов активной зоны ГТ-МГР изложены применительно к рассматриваемым видам топлива и конкретным вариантам. Перечень рассматриваемых топливных композиций и топливных циклов приведен в таблице 1.2. Представлены в том числе варианты топливной загрузки, включающей минорные (или «младшие») актиниды (МА).

Основные результаты оценки продолжительности топливного цикла для рассматриваемых вариантов загрузки топлива, а также глубины выгорания при трехкратной схеме перегрузки представлены в таблице 1.3. Расход делящихся изотопов оценивался при одинаковых рабочих состояниях (при ограничении запаса реактивности).

Таблица 1.2 – Характеристика рассматриваемых типов топлива

Вариант	Тип топлива	Топливная композиция	Обогащение по делящимся изотопам в уране или плутонии в ядрах	Весовая доля воспроизводящего материала в топливной композиции
1	U-обогащ.	U-235 (14 %) + U-238 (86 %)	14 % (U-235)	~ 86 % (U-ест.)
2	U + Th	U (15 %) + Th (85 %)	93 % (U-235)	~ 85 % (Th) ~ 1 % (U-238)
3	Pu-чистый	Pu-239 (91,7 %) + Pu-240 (6,6 %) + Pu-241 (1,2 %) + Pu-242 (0,4 %) + Pu-238 (0,1 %)	~ 93 % (Pu-дел.)	7 % (Pu-240 и Pu-242)
4	Pu-реакторный	Pu-239 (59 %) + Pu-240 (24 %) + Pu-241 (11 %) + Pu-242 (5 %) + Pu-238 (1 %)	70 % (Pu-дел.)	29 % (Pu-240 и Pu-242)
5	MOX	Pu-чистый (50 %) + U-ест. (50 %)	~ 47 % (Pu-дел.)	~ 50 % (U-ест.) + 3,5 % (Pu-240 и Pu-242)
6	Pu-чистый + МА*	Pu-чистый (78 %) + МА (22 %)	~ 73 % (Pu-дел.)	~5 % (Pu-240 и Pu-242)
7	Pu-реакторный + МА*	Pu-реакторный. (90 %) + МА (10 %)	64 % (Pu-дел.)	26 % (Pu-240 и Pu-242)

\*Изотопный состав минорных актиноидов:

Am241/Am242/Am243/Cm244/Cm245: 81,8/0,3/14,8/2,9/0,2 % %.

Таблица 1.3 – Характеристика рассматриваемых типов топлива

Характеристики	Урановое топливо	Уран – ториевое топливо	Топливо на основе чистого плутония	Топливо на основе реакторного плутония	МОХ-топливо на основе чистого плутония	Топливо на основе чистого плутония сМА	Топливо на основе реакторного плутония сМА
1	2	3	4	5	6	7	8
Загрузка $B_{\text{ест}} / E_{\text{г}}$ на ТВС, г	14,7 / -	41,5 / -	- / 440	26,5 / -	- / 230	-	-
Загрузка U-235, либо Pu-делящегося на ТВС, кг	0,7	0,7	0,64	0,54	0,77	0,82	0,46
Общая загрузка тяжелых изотопов (U, Th, Pu) на ТВС, кг	5,0	5,0	0,69	0,77	1,64-	1,13	0,78
Глубина выгорания, МВт·сут/кг $\tau_{\text{д}}$	120	129	640	680	420	630	525
Время между перегрузками, эфф.сут	308	330	250	280	370	380	220
Удельный расход делящихся изотопов, г/(МВт·сут)	1,17	1,08	1,45	1,03	1,12	1,19	1,12

Из рассматриваемых топливных циклов наименьший расход делящихся изотопов характерен для топлива на основе реакторного плутония (таблица 1.3), что является результатом относительно высокого уровня воспроизводства нечетных изотопов Pu. Это же характеризует топливо на основе высокообогащенного U, разбавленного Th. Вариант использования чистого плутония характеризуется максимальным потреблением делящихся изотопов.

## 1.6 Топливо в высокотемпературной газоохлаждаемой ториевой реакторной установке

Микротопливо представляет собой керн из делящегося материала с покрытием, диспергированный в графитовую матрицу цилиндрических топливных таблеток (ТТ), которые размещаются в активной зоне

высокотемпературной газоохлаждаемой ториевой реакторной установки (ВГТРУ). В качестве делящегося материала (тяжелого металла) используется Pu и  $^{232}\text{Th}$ , взятые в разных пропорциях. Микротопливо имеет два слоя покрытия: 1 – углерод пиролитический (PyC) с плотностью  $1,9 \text{ г/см}^3$ , 2 – карбид кремния (SiC) с плотностью  $3,20 \text{ г/см}^3$ . Конфигурации ядра, покрытий и ТТ представлены на рисунке 1.2.

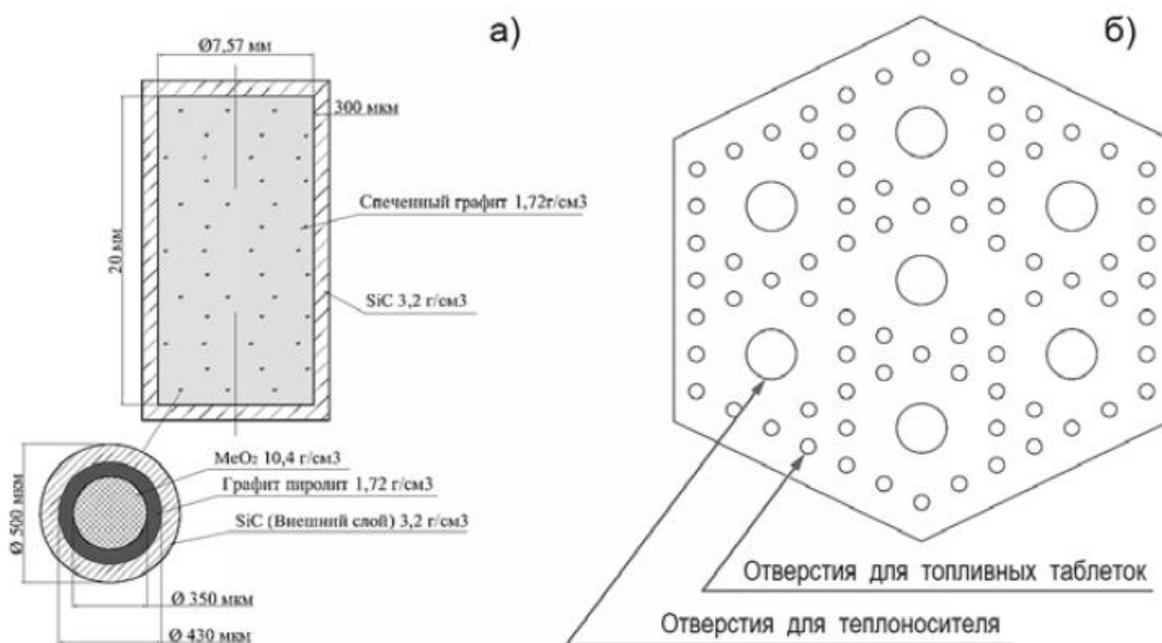


Рисунок 1.2 – Расчетная модель тепловыделяющей сборки ВГТРУ:

а) – топливная таблетка ВГТРУ типа 0500 и 1000;

б) – тепловыделяющая сборка ВГТРУ

В расчетах рассмотрены три типа ТТ ВГТРУ. Конструкционные характеристики ТТ типа 0500 и 1000 (см. рисунок 1.2): диаметр  $8,17 \text{ мм}$  (с покрытием из SiC); высота  $20,6 \text{ мм}$  (с покрытием из SiC); объем  $1080 \text{ мм}^3$ . ТТ типа 2000: диаметр  $12 \text{ мм}$  (с покрытием из SiC); высота  $20,6 \text{ мм}$  (с покрытием из SiC); объем  $2330 \text{ мм}^3$ . Детальная классификация рассматриваемых типов ТТ приведена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Классификация топливных таблеток ВГТРУ

Тип топливной таблетки	Объем топлива, мм <sup>3</sup>	Объем графита, мм <sup>3</sup>	Объем SiC, мм <sup>3</sup>	Масса металла, г
0500	11,22	877,01	191,70	0,1027
1000	22,45	853,87	203,60	0,2055
2000	44,89	1948,87	336,04	0,4109

Расчеты показали, что более перспективным решением представляется вариант, когда активная зона реактора набирается из ТВС только одного типа, содержащая торий и плутоний в одинаковых количествах. В этом случае для большой активной зоны начальный запас реактивности увеличивается до 25,3 %, а длина кампании до 210 эфф. сут. При такой загрузке распределение плотности потока и энерговыделения становится более равномерным по всему реактору.

### 1.7 Имитаторы делящихся материалов

Делящиеся материалы, используемые в ДЯТ в основном представлены в виде смесей оксидов урана, тория и плутония. Ввиду их повышенной радиационной активности изготовление топливных таблеток и дальнейшие их исследования представляются сложной задачей. Поэтому оксиды ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub> и PuO<sub>2</sub> в составе таблеток заменяются на имитаторы, которые обладают наиболее близкими к ним свойствами. В качестве имитаторов делящихся материалов используются оксиды CeO<sub>2</sub>, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Церий относится к редкоземельным металлам – лантаноидам – и проявляет валентности 3 и 4. Он образует два оксида – оксид церия (III) (Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и оксид церия (IV) (CeO<sub>2</sub>).

CeO<sub>2</sub> имеет большую плотность упаковки и большую плотность, чем Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Значения плотности для CeO<sub>2</sub> составляет 7,65 г/см<sup>3</sup>. Оксид церия имеет высокую механическую твердость, химически инертен и устойчив к воздействию высоких температур.

Диоксид церия является широкозонным полупроводниковым материалом с шириной запрещенной зоны  $\sim 3,2$  эВ.  $\text{CeO}_2$  оптически прозрачен в видимой области спектра. Его полоса поглощения располагается в УФ области спектра на длинах волн менее 320 нм. Показатель преломления оксида церия  $\sim 2$ . В щелочной среде трехвалентный церий легко окисляется до четырехвалентного; в кислой же, наоборот, соединения четырехвалентного церия малоустойчивы. В таких условиях они выступают как довольно сильные окислители.

Диоксид церия имеет кубическую гранцентрированную решетку (структурный тип флюорита, пространственная группа  $Fm\bar{3}m$ ) с параметром элементарной ячейки  $a=5,411 \text{ \AA}$ . У  $\text{ThO}_2$  кристаллическая структура типа флюорита (кубическая сингония),  $a=5,5859 \text{ \AA}$ ,  $d=9,7$ .

Свойства диоксида церия и диоксида тория представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Свойства диоксида церия и диоксида тория

	$\text{CeO}_2$	$\text{ThO}_2$
Молярная масса, г/моль	172,115	264,04
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	7,65	9,7
Температура плавления, °С	2400	3050
Температура кипения, °С	3500	$\approx 4400$
Растворимость в воде, г/100 мл	16	нерастворим

Оксид неодима (III) – это бинарное неорганическое соединение металла неодима и кислорода; формула –  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , является нерастворимым в воде.  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  образует голубовато-фиолетовые кристаллы нескольких кристаллических модификаций.

Оксид неодима (III) образует голубовато-фиолетовые кристаллы нескольких кристаллических модификаций:

- $\alpha\text{-Nd}_2\text{O}_3$  - кубическая сингония, пространственная группа  $I a\bar{3}$ , параметры ячейки  $a=1,1140 \text{ нм}$ ,  $Z=16$ , существует при температуре ниже  $600\text{-}850 \text{ }^\circ\text{C}$ .

- $\beta$ -Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - гексагональная сингония, пространственная группа R 3m1, параметры ячейки a=0,3831 нм, c=0,6008 нм, Z=1, существует при температуре выше 600-850 °С.

UO<sub>2</sub> – кристаллы со структурой типа флюорита (CaF<sub>2</sub>). Способность урана в форме диоксида иметь этот тип решетки подобно лантаноидам дополнительно свидетельствует о его принадлежности к III группе.

Свойства оксида неодима и диоксида урана представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Свойства оксида неодима и диоксида урана

	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	UO <sub>2</sub>
Молярная масса, г/моль	336,48	270,03
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	7,24	10,97
Температура плавления, °С	2233	2875
Температура кипения, °С	3760	3640
Растворимость в воде, г/100 мл	нерастворим	нерастворим

Оксид самария (III) — бинарное неорганическое соединение металла самария и кислорода; формула – Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, светло-жёлтые кристаллы, нерастворимые в холодной воде, реагирует с горячей.

Оксид самария имеет два типа кристаллических решеток:

- Кубическая решетка имеет параметры ячейки a=1,0915 нм, Z=16 и существует в стабильном состоянии до температуры 875 °С.
- При превышении данной температуры кубическая решетка преобразуется в моноклинную с параметрами ячейки a=1,4170 нм, b=0,3633 нм, c=0,8847 нм, β=99,96°, Z=6.

PuO<sub>2</sub> имеет кубическую структуру типа флюорита, изоморфную с UO<sub>2</sub>. Элементарная ячейка содержит 4 атома плутония и 8 атомов кислорода. Период кристаллической решетки равен 5,396 ± 0,001 Å.

Свойства оксида самария и диоксида плутония представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Свойства оксида самария и диоксида плутония

	$\text{Sm}_2\text{O}_3$	$\text{PuO}_2$
Молярная масса, г/моль	348,72	276,06
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	7,43	11,5
Температура плавления, °С	2270	2400
Температура кипения, °С	4118	2800
Растворимость в воде, г/100 мл	нерастворим	нерастворим

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

Цель дипломной работы: проведение исследования влияния параметров процессов изготовления пресс-порошка, прессования и обжига на свойства получаемых модельных топливных таблеток на основе углеродной матрицы.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта по отработке процесса получения модельных топливных таблеток.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить потенциальных потребителей результатов исследования.
2. Провести анализ конкурентных технических решений.
3. Выполнить SWOT-анализ: описать сильные и слабые стороны проекта, выявить возможности и угрозы для реализации проекта.
4. Оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации.
5. Построить календарный план-график проведения работ научно-исследовательского проекта.
6. Рассчитать бюджет научного исследования.
7. Определить ресурсную, финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективности исследования.

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

В процессе написания магистерской диссертации были определены потенциальные потребители результатов исследования. Целевым рынком будут являться корпорации по атомной энергии, а также научно-исследовательские центры.

Сегментировать рынок услуг по способу эксплуатации ДЯТ в матрице из углерода можно относительно степени потребности топлива. Результаты сегментирования представлены в рисунке 3.1.

		Способ эксплуатации ДЯТ		
		Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы	Атомные подводные лодки	Исследовательские реакторы
Потребность	Сильная			
	Слабая			

Рисунок 3.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию ультракороткоживущих изотопов

Таким образом, на основании данной карты сегментирования можно заключить, что больше всего в ДЯТ нуждаются ВТГР и атомные подводные лодки, где топливо используется по прямому назначению – выделению энергии.

### 3.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Чтобы выявить ресурсоэффективность разработки и определить направления для ее будущего повышения, необходимо провести анализ конкурентных технических решений с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 3.1. В таблице представлены следующие показатели конкурентоспособности: использование дисперсионного ядерного топлива в матрице из углерода (ф), использование керамического ядерного топлива (к1), использование металлического ядерного топлива (к2). Позиция разработки и

конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – слабая позиция, а 5 – сильная. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Таблица 3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспо-собность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1.Повышение производительности труда	0,2	5	4	3	1	0,80	0,60
2.Удобство в эксплуатации	0,15	5	4	4	0,75	0,60	0,60
3. Энергоэкономичность	0,10	4	4	3	0,40	0,40	0,30
4. Надежность	0,14	5	3	4	0,70	0,42	0,56
5.Простота эксплуатации	0,14	5	5	4	0,70	0,70	0,56
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
2. Уровень проникновения на рынок	0,06	3	3	5	0,18	0,18	0,30
3. Цена	0,08	3	4	4	0,24	0,32	0,32
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	5	4	3	0,30	0,24	0,18
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>40</b>	<b>35</b>	<b>34</b>	<b>4,62</b>	<b>3,94</b>	<b>3,70</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot V_i \quad (3.2.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Коэффициент конкурентоспособности предприятия:

$$k_K = \frac{K_{\phi}}{K_{\text{ср}}} = \frac{4,62}{(3,94 + 3,7) / 2} = 1,21, \quad (3.2.2)$$

Таким образом  $k_k > 1$ , следовательно, использование дисперсионного ядерного топлива в матрице из углерода является конкурентоспособным.

### 3.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой сводную таблицу, иллюстрирующую связь между внутренними и внешними факторами компании. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

В таблице 3.2 приведена матрица SWOT-анализа для изготовления пресс-порошка, прессования и обжига топливных таблеток на основе углеродной матрицы.

Таблица 3.2 – Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны С1. Высокие значения коэффициента теплопроводности; С3. Отрицательный плотностной коэффициент реактивности; С3. Коррозионная и эрозийная устойчивость матрицы; С4. Высокая температура плавления	Слабые стороны Сл1. Низкая объемная доля делящегося вещества; Сл2. Слабо налаженная технология производства; Сл3. Низкий уровень проникновения на рынок.
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Увеличение доли дисперсионного ядерного топлива в атомной отрасли;</p> <p>В2. Рост доли энергопотребления, приходящейся на атомную энергетику;</p> <p>В3. Повышение показателей безопасной и надежной эксплуатации ядерных энергетических установок.</p> <p>В4. Увеличение рабочих температур эксплуатации</p>	<p>1. Хорошие теплопроводящие свойства обуславливают безопасную и надежную эксплуатацию данного вида топлива.</p> <p>2. Коррозионная и эрозийная устойчивость матрицы обуславливает высокую степень внутренней устойчивости.</p> <p>3. Высокая температура плавления позволяет эксплуатировать данный вид топлива при высоких</p>	<p>1. Низкая объемная доля делящегося вещества способствует увеличению затрат на обогащение, что может помешать широкому применению данного вида топлива.</p> <p>2. Низкий уровень проникновения на рынок данного вида топлива может негативно повлиять на долю энергопотребления, приходящуюся на атомную</p>

ядерного топлива	температурах. 4. Проникновение дисперсионного топлива на рынок может поспособствовать возникновению исследований в области использования новых ядерных реакторов.	энергетику. 3. Усовершенствование технологии производства данного вида топлива потребует значительного количества времени
Угрозы У1. Природные катаклизмы. У2. Снижение государственного финансирования атомной энергетики; У3. Угроза диверсионных и террористических действий в отношении ЯЭУ	1. Преимущества данного вида топлива ведут за собой привлечение действий террористического и диверсионного характера; 2. Отрицательный плотностной коэффициент реактивности обеспечивает внутреннюю устойчивость установки при природных катаклизмах и авариях; 3. Преимущества данного вида топлива перед конкурентами вызывает дополнительный интерес у государства.	1. Необходимо провести подробное изучение данного вида топлива для поддержания интереса к проекту со стороны государства. 2. Возникновение аварии снизит интерес к проектам подобного рода вплоть до полного отказа от их применения.

Проанализировав характер НТИ можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. 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 данном проекте на российском рынке, одно (Росэнергоатом). Соответственно, рынок монополизирован. В свою очередь, данное предприятие требует тесного взаимодействия и сотрудничества с другими производственными компаниями, обеспечивающими нормальную эксплуатацию ядерно-энергетической установки и изготавливающими реакторные материалы.

### 3.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценим степень готовности научной разработки к коммерциализации и выясним уровень собственных знаний для ее проведения. Для этого заполним специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

Таблица 3.3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	3
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	5
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки,	2	4

	получения льгот		
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	5
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	47	52

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (3.4.1)$$

где

$B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение  $B_{\text{сум}}$  получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика

достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что перспективность коммерциализации находится на уровне выше среднего. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта, которая включает в себя анализ рынков сбыта, разработку бизнес-плана и т.д.

### 3.5 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта.

Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
АО «Концерн Росэнергоатом»	Получение и последующее использование результатов исследования влияния параметров процессов изготовления пресс-порошка, прессования и обжига на свойства получаемых

	модельных топливных таблеток на основе углеродной матрицы.
--	--

В таблице 3.5 представлена информация об иерархии целей проекта и их критериях достижения.

Таблица 3.5 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Проведение анализа модельных топливных таблеток на основе углеродной матрицы с последующими выводами об их свойствах.
Ожидаемые результаты проекта:	Успешное проведение исследования, которое позволит определить влияние параметров процессов изготовления пресс-порошка, прессования и обжига на свойства получаемых таблеток.
Критерии приемки результата проекта:	Результаты проведенного исследования должны соответствовать теоретическим выкладкам о данном исследовании, а также требованиям безопасной эксплуатации данного типа топлива.
Требования к результату проекта:	Требование:
	Получение модельных топливных таблеток с заданными параметрами
	Проведение анализа на теплопроводность полученных таблеток
	Сравнительный анализ результатов анализа для выявления преимуществ и недостатков топливных композиций

На следующем этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в табличной форме (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Видяев Д.Г., ТПУ,	Руководитель	Реализация проекта в	435

	профессор	проекта	пределах заданных ограничений по ресурсам, координация работы по проекту.	
2	Цветков А.Д., НИ ТПУ, магистр	Исполнитель по проекту	Выполнение исследования по проекту.	540
ИТОГО:				975

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках данного проекта. Данная информация представлена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
Бюджет проекта	412431,69 руб.
Источник финансирования	НИ ТПУ
Сроки проекта	01.02.2021-31.05.2021
Дата утверждения плана управления проектом	22.01.2021
Дата завершения проекта	31.05.2021

Таким образом, установлены цели и результаты проекта, рассмотрена организационная структура проекта, определены ограничения и допущения проекта.

### 3.6 Планирование управления научно-исследовательского проекта

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и инженер (И). После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение задания	И, НР
	2	Календарное планирование работ по теме	И, НР

	3	Изучение материалов по теме	И
Выбор направления исследований	4	Анализ литературных источников по твэлам на основе углеродной матрицы, используемых на АЭС	И
	5	Выбор метода выполнения исследования	И, НР
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Изготовление модельных топливных таблеток	И, НР
	7	Анализ полученных образцов	И, НР
Обобщение и оценка результатов	8	Составление отчета по работе	И

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Линейный график представлен в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	3	01.02.2021	3.02.2021	Цветков А.Д. Видяев Д.Г.
2	Календарное планирование работ по теме	6	10.02.2021	15.02.2021	Цветков А.Д. Видяев Д.Г.
3	Изучение материалов по теме	11	16.02.2021	26.02.2021	Цветков А.Д.
4	Анализ исходных параметров	9	01.03.2021	09.03.2021	Цветков А.Д.
5	Выбор метода выполнения работы	9	10.03.2021	18.03.2021	Цветков А.Д. Видяев Д.Г.
6	Применение метода к исходным параметрам	27	20.03.2021	15.04.2021	Цветков А.Д. Видяев Д.Г.
7	Анализ результатов работы	32	17.04.2021	18.05.2021	Цветков А.Д. Видяев Д.Г.
8	Составление отчета по работе	13	19.05.2021	31.05.2021	Цветков А.Д.
ИТОГО:		110			

Диаграмма Гантта – 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.

График строится в виде таблицы 3.10 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.

Таблица 3.10 – Календарный план-график проведения работ

Код работ ы	Вид работ	Исполнители	$T_{ki}$	Продолжительность выполнения работ											
				февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	Научный руководитель, инженер	3	■											
2	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, инженер	6		■										
3	Изучение материалов по теме	Инженер	11			■									
4	Анализ исходных параметров	Инженер	9				■								
5	Выбор метода выполнения работы	Научный руководитель, инженер	9					■							
6	Применение метода к исходным параметрам	Научный руководитель, инженер	27						■	■					
7	Анализ результатов работы	Научный руководитель, инженер	32									■	■		
8	Составление отчета по работе	Инженер	13												■

■ – инженер, ■ – научный руководитель.

Таким образом, построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

### 3.7 Бюджет научного исследования

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

- материальные затраты НИИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).

Отразим стоимости всех материалов, используемых при разработке проекта, включая расходы на их приобретение и, при необходимости, на доставку. Эти данные представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Бумага, формат А4	Пачка	1	295	295
Картридж для принтера	Шт	1	2650	2650
Программное обеспечение Windows	Шт	1	13000	13000
Итого:				15945

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (3.8.3)$$

где

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (3.8.4)$$

где

$Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: 10,4;

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

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m \cdot (1 + k_{пр}) \cdot k_p, \quad (3.8.5)$$

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

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

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (г. Томск).

Таблица 3.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	118	118
– праздничные дни		
Потери рабочего времени:		
– отпуск	48	48
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	247	247

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$Z_m = 39250 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 66332,5 \text{ руб.}$$

$$Z_{дн} = \frac{66332,5 \cdot 10,4}{247} = 2792,9 \text{ руб.}$$

$$Z_{осн} = 2792,9 \cdot 70 = 195503 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для инженера:

$$Z_m = 14874,45 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 25137,82 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{25137,82 \cdot 10,4}{247} = 1058,43 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 1058,43 \cdot 103 = 109018,29 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведем в таблице 4.13.

Таблица 3.13 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Научный руководитель	39250	0,3	1,3	56277	2792,9	70	195503
Инженер	14874,45	0,3	1,3	25137,82	1058,43	103	109018,29
Итого:							304521,29

Отразим обязательные 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.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (3.8.4)$$

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

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды приведем в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.
Научный руководитель	195503
Инженер	109018,29
Коэффициент отчислений	0,302
Итого:	91965,4

Расчитанная 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. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Расчет бюджета затрат НИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	15945
Основная заработная плата	304521,29
Отчисления во внебюджетные фонды	91965,4
Бюджет затрат:	412431,69

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). Бюджет затрат составил 412431,69 рублей.

### 3.8 Определение ресурсной, 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:

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (3.9.1)$$

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

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (3.9.2)$$

где

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

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,10	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	3
3. Помехоустойчивость	0,15	4	4
4. Энергосбережение	0,25	4	3
5. Надежность	0,20	4	4
6. Материалоемкость	0,15	5	4
Итого:	1	26	21

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

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

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

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p-\text{исп.}i}}{I_{\text{финр.}i}} \quad (3.9.3)$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.}1}}{I_{\text{исп.}2}} \quad (3.9.4)$$

Таблица 3.17 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
	Интегральный показатель	4,3	3,5

	ресурсоэффективности разработки		
	Интегральный показатель эффективности	4,3	3,5
	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,229	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности.

### **Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»**

1) Потенциальными потребителями результатов исследования являются корпорации по атомной энергии, научно-исследовательские центры.

2) В результате проведения анализа конкурентных технических решений сделан вывод о том, что разрабатываемый метод получения топливных таблеток в матрице из углерода является наиболее предпочтительным, чем технология, используемая в производстве на данный момент.

3) Определены сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы для реализации проекта. Сильные стороны НТИ: высокие значения коэффициента теплопроводности, отрицательный плотностной коэффициент реактивности, коррозионная и эрозионная устойчивость матрицы, высокая температура плавления. Возможности: увеличение доли дисперсионного ядерного топлива в атомной отрасли, рост

доли энергопотребления, приходящейся на атомную энергетику, повышение показателей безопасной и надежной эксплуатации ядерных энергетических установок, увеличение рабочих температур эксплуатации ядерного топлива. По итогам выполнения SWOT-анализа выбраны наиболее эффективные стратегии.

4) Оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации показала уровень выше среднего, который можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта.

5) В процессе планирования научно-исследовательского проекта построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

6) При планировании бюджета рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды. Бюджет затрат составил 412431,69 рублей.

7) Оценка эффективности исследования показала, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

## **4 Социальная ответственность**

Повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса является одним из основных направлений, способствующих улучшению всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

Опасным производственным фактором, согласно, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья [15].

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

### **4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

При работе на оборудовании: ПЭВМ, гидравлический пресс Carver B, трубчатая печь фирмы Carbolite, модель STF, на инженера воздействуют следующие факторы:

1. Физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, электромагнитное поле низкой частоты, освещенность, наличие излучения, вредные вещества, механическое воздействие.

2. Психофизические: физические перегрузки (статические, динамические); длительная, монотонная работа, требующая постоянной концентрации; нервно-психические перегрузки (умственное напряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

В таблице 4.1 приведены основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Таблица 4.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Проведение вычислительных и графических работ на ПЭВМ	Воздействие ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее	–	СанПиН 1.2.3685-21 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»

Продолжение таблицы 4.1

	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ Электробезопасность
	—	Пожароопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов ГОСТ Р12.1.004-91 ССБТ
Работа с мелкодисперсными веществами	Поражение внутренних органов	—	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности
Работа на оборудовании: прессование углерода	—	Механическая опасность	ГОСТ 31733-2012 Прессы гидравлические
Работа с трубчатой печью	—	Термическая опасность	ГОСТ Р 53682-2009 Установки нагревательные для нефтеперерабатывающих заводов
	—	Пожароопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов ГОСТ Р12.1.004-91 ССБТ
	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ Электробезопасность

Анализ вредных и опасных факторов проводится на основе нормативных документов, приведённых в таблице 4.1.

## **4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния**

### **4.2.1 Организационные мероприятия**

Каждый сотрудник обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Вводный инструктаж и инструктаж на рабочем месте ответственным лицом – обязательные составляющие обучения персонала технике безопасности и производственной санитарии.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Перед тем, как приступить к работе, состояние здоровья устанавливают медицинским освидетельствованием.

### **4.2.2 Организация рабочего места оператора ПЭВМ**

Планировка рабочего места должна предусматривать чёткий порядок и постоянство размещения предметов и документов.

Оптимальное размещение компьютерной периферии следующее:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа).

При проектировании стола для работы с ПЭВМ учитывают следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола составляет 680÷800 мм. Высота рабочей поверхности для клавиатуры – 650 мм. Ширина и длина рабочего стола не менее 700 мм и 1400 мм соответственно. Пространство для ног составляет не менее 600 мм по высоте, ширина – не менее 500 мм; глубина на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Монитор должен располагаться на уровне глаз оператора на расстоянии 500 – 600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Так же должна присутствовать возможность регулировки яркости и контрастности экрана и регулировка поворота монитора по высоте и углам наклона.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края, на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Клавиатура должна быть удобной для работы с ней. Например, можно использовать механическую клавиатуру с вогнутыми клавишами и символами на них контрастного цвета по отношению к цвету самой клавиатуры.

Рабочее кресло должно быть регулируемым по высоте и углу поворота, а также – по углу наклона спинки сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420÷550 мм.

На рисунке 4.1 показано как каждый объект должен располагаться в пределах досягаемости рабочего пространства.

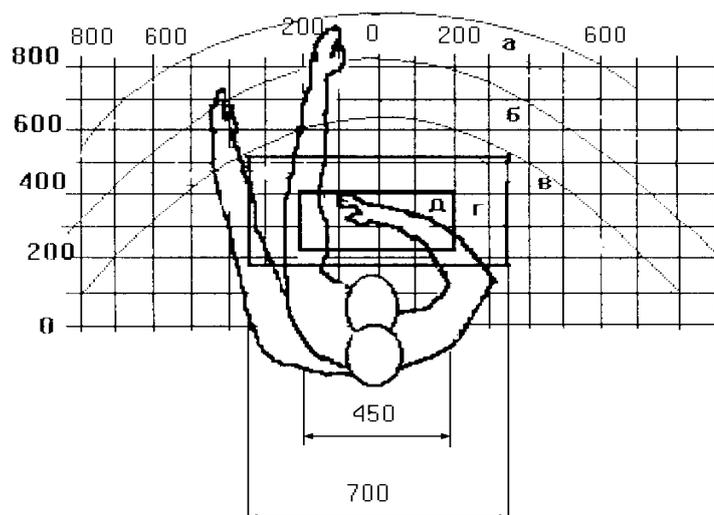


Рисунок 4.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- а – зона максимальной досягаемости рук;
- б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в – зона легкой досягаемости ладони;
- г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

При однообразной умственной работе выбирают неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание. При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

### 4.3 Безопасность при работе с вредными веществами

В химической промышленности, где человек имеет дело с сыпучими, вредными, ядовитыми веществами, горючими жидкостями, различными газами, высоковольтной аппаратурой особо остро встает вопрос охраны труда. Необходимо на всех предприятиях внедрять современные средства техники

безопасности и обеспечить санитарно-гигиенические условия с тем, чтобы сократить производственный травматизм и профессиональные заболевания.

Мероприятия по охране труда направлены на решение следующих задач:

- предупреждение возникновения аварийных ситуаций (взрыв, пожар)
- соблюдение техники безопасности
- обеспечение производственной санитарии и личной гигиены

Для решения этих задач необходимо знать свойства применяющихся веществ, соблюдать правила работы с вредными веществами, соблюдать правила ТБ.

При работе с оксидами церия, неодима и самария, которые являются мелкодисперсными веществами, попадание их на кожу или вдыхание может привести к поражению внутренних органов.

Меры безопасности при работе с мелкодисперсными веществами и используемые средства индивидуальной защиты.

– Все работы с веществами в дисперсном состоянии необходимо проводить при включенной общей вентиляции, при приготовлении шихты использовать местную вытяжную вентиляцию.

– Все работы проводить в респираторе «Лепесток», резиновых перчатках, защитных очках и защитной спец. одежде.

– Взвешивание компонентов шихты проводить в вытяжном шкафу.

– При разбивке на монокристаллические блоки, отделении гарнисажной крошки и отходов использовать все индивидуальные средства защиты: респиратор, перчатки, защитные очки.

– После окончания работы тщательно вымыть руки, лицо.

#### **4.4 Электробезопасность**

При работе с ЭВМ и трубчатой печью существует угроза поражения электрическим током. Не следует работать с оборудованием в условиях

повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящих пыли или полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования [16].

Оператор ЭВМ и трубчатой печью работает с электроприборами: компьютером и периферийными устройствами.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям под напряжением в случае их неисправности;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках (блоке питания и блоке дисплейной развёртки).

Действие электрического тока на организм человека своеобразно и носит разносторонний характер. Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает термическое, электролитическое и биологическое воздействие на различные системы организма. При этом могут возникнуть нарушения деятельности жизненно важных органов человека: мозга, сердца и легких.

Все виды действия электрического тока на организм человека можно объединить в два основных: электрические травмы и электрические удары.

Электрические травмы – это местные поражения тела: ожоги, металлизация кожи, механические повреждения организма.

Электрический удар вызывает возбуждение живых тканей организма проходящим через него электрическим током, сопровождающееся произвольными судорожными сокращениями мышц, в том числе мышц сердца и легких. В результате могут возникнуть различные нарушения

жизнедеятельности организма и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения.

Для обеспечения электробезопасности проводят следующие мероприятия: отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы; вывешивание плакатов, указывающих место работы; заземление корпусов всех установок через нулевой провод; покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией; изолирование токоведущих частей аппаратуры с помощью корпусов, не проводящих ток.

#### 4.5 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [17] и приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

Для оздоровления и поддержания в норме воздушной среды помещения необходимы правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. В помещение должны подаваться следующие

объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> допускается естественная вентиляция, в том случае если нет дополнительных источников выделения вредных веществ.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20÷25 °С, зимой – 13÷15 °С.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеосоединения. Согласно [16] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц÷2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц÷400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц÷2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц÷400 кГц – 25 нТл.

Для уменьшения воздействия электромагнитного излучения на организм необходимо выполнять следующие меры:

- расстояние до монитора должно составлять не менее 50 см;
- не допускается использование мерцающего монитора (частота кадров монитора не менее 70 Гц);
- расположение верхнего края монитора должно располагаться на уровне глаз;
- регулярные перерывы в работе.

Источником ионизирующего излучения в компьютере является дисплей. Под влиянием данного излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. Конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 5 см от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть вызвана недостатком света в рабочем помещении или чрезмерной освещенностью, а также неправильным направлением света. Нельзя допускать освещение экрана направленными яркими источниками света. Помещения с ЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Для данного типа работ минимальная освещенность в лаборатории должна составлять 300÷500 лк.

#### **4.6 Пожарная безопасность**

По пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества. Помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В [18], т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, поэтому необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей.

Для предупреждения возникновения пожара необходимы соблюдение следующих правил пожарной безопасности на рабочем месте, проведение противопожарного инструктажа рабочих и служащих.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на организационные, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения [19].

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер.

Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания);
- правильное содержание зданий и территорий (предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, плана эвакуации;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

- правильное размещение оборудования;

- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- Сообщить руководству (дежурному).

- Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел.

112.

- Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

#### **4.7 Термическая безопасность при работе с трубчатой печью**

При работе с трубчатой печью можно получить термические ожоги различной степени тяжести. Перед началом работы оператору необходимо воспользоваться средствами индивидуальной защиты. Оператор должен надеть выданную спецодежду, обувь и рукавицы.

При нагреве образцов в трубчатой печи следует строго соблюдать ряд правил, изложенных в прилагаемой к ней технической документации:

- Печь следует установить в хорошо вентилируемом помещении вдали от источников тепла и на поверхности, устойчивой к случайным разливам горячих материалов. Не ставить печь на воспламеняемом основании.

- Обеспечить свободное пространство вокруг печи. Не блокировать вентиляционные отверстия в блоке управления: они необходимы для охлаждения.

- Печь должна быть расположена таким образом, чтобы ее можно было быстро выключить и отсоединить от электропитания.

- Срок службы нагревательных элементов сокращается при использовании при температурах, близких к максимальной. Без необходимости

не оставлять печь при высокой температуре. Максимальная температура указана на идентификационной табличке печи.

– Убедиться, что рядом нет воспламеняемых объектов, на которые может упасть рабочая трубка в случае разлома.

#### **4.8 Требования безопасности во время работы с гидравлическим прессом**

При работе с прессом существует вероятность получения травм в результате защемления, удара, осколочного попадания.

Для обеспечения безопасности во время работы с прессом оператор обязан соблюдать и выполнять следующие правила [20]:

- Выполнять указания руководителя.
- Контролировать соблюдение заданного режима при прессовании.
- Непрерывно наблюдать за давлением и уровнем масла в прессе.
- Вести наблюдение за герметичностью всех соединений технологических трубопроводов, шлангов и гидроцилиндров.
- Отсоединять шланги, только убедившись, что арматура отключена, и давление по манометру полностью сброшено.

Во время работы не разрешается:

- Вести у пресса какие-либо работы, не относящиеся к прессованию.
- Производить ремонт и подтягивать резьбовые соединения оборудования, находящегося под давлением.
- Использование открытого огня на рабочем месте.
- Присутствие посторонних людей.
- Оставлять без надзора работающий пресс.

При работе на прессе аварийные остановки производятся в следующих случаях:

- при несчастном случае с работающими;
- при срыве или разрыве маслопроводов;

- при обнаружении утечки в соединениях маслопроводов и арматуры;
- при нарушении в работе электрооборудования;
- при возможности возникновения пожара.

В этих случаях оператор обязан:

- отключить электропитание пресса;
- оказать первую медицинскую помощь пострадавшим;
- приступить к тушению пожара;
- сообщить о случившемся руководителю;
- принять необходимые меры по ликвидации обнаруженного повреждения.

По окончании работы необходимо:

- опустить верхнюю плиту пресса;
- отключить электропитание пресса;
- снизить давление масла в гидросистеме;
- убрать и привести в порядок рабочее место и доложить руководителю об окончании работ.

## Заключение

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований, приведенных в настоящей работе, сделан ряд выводов:

1. Проведен анализ свойств дисперсионного топлива, используемого в реакторах ВТГР. Рассмотрены особенности данного типа реакторов.

2. Определены модельные оксиды, которые выступают в роли имитаторов делящихся материалов в топливной таблетке. Наиболее близкими по свойствам к оксидам  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{UO}_2$  и  $\text{PuO}_2$  являются оксиды лантаноидов  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  и  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  соответственно. Также определены составы топливных композиций: массовое содержание оксидов в таблетке представлено в трех вариациях – 70 %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  + 30 %  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ , 100 %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , 50 %  $\text{CeO}_2$  + 50 %  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ . Объёмное содержание оксидов в таблетке составляет 15 %.

3. Изготовлены таблетки из пресс-порошков различного состава, проведен их отжиг при температуре 1200°C и анализ полученных образцов.

Установлено, что в результате отжига плотность таблеток возрастает, причем максимальный рост проявляется у углеродных таблеток с добавлением оксидов  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  и  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ .

Показано, что явной зависимости плотности полученных таблеток от давления прессования и способа перемешивания пресс-порошков не наблюдается.

4. Проведён расчет экономических затрат. Бюджет затрат составил 412431,69 рублей. Проведён анализ социальной ответственности, в частности, вредных и опасных факторов в ходе выполнения ВКР, а также основных мер безопасности, согласно нормативным документам.

## Список публикаций

1. Борецкий Е.А. Получение пластификатора для таблетирования технического углерода / Е.А. Борецкий, В.В. Дмитриев, А.Д. Цветков; науч. рук. Д.Г. Видяев // Изотопы: технологии, материалы и применение: материалы V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 19-23 ноября 2018 г. – Томск: Графика, 2018. – [С. 96].

2. Цветков А.Д. Развитие адсорбционной способности углеродных материалов / А.Д. Цветков, В.В. Сукотнова; науч. рук. Е.А. Борецкий // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов VI Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 26-29 октября 2020 г. – Томск: ТПУ, 2020. – [С. 55-56].

## Список использованных источников

1. В.С. Корсаков, В.Ф. Выговский, В.И. Михан. Технология реакторостроения. М.: «Атомиздат», 1977, с. 270.
2. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
3. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Торий в ядерной энергетике. – М.: Техносфера, 2014. – 394 с
4. Ф.М. Митенков, Н.Г. Кодочигов, А.В. Васяев, В.Ф. Головкин, Н.Н. Пономарев-Степной, Н.Е. Кухаркин, А.Я. Столяревский. Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор – энергоисточник для промышленного производства водорода // Атомная энергия. 2004, т.97, в. 6, с. 432-446.
5. Н.Г. Кодочигов, С.Ф. Шепелев. Анализ аварийных режимов модульного ВТГР // Атомная энергия. 2007, т. 102, в. 1, с. 53-57.
6. А.С. Черников, Н.Н. Пономарев-Степной, Ю.В. Конилов и др. Шаровые твэлы ВТГР и некоторые результаты их испытаний // Атомно-водородная энергетика и технология. М.: «Энергоатомиздат», 1986, в. 7, с. 185-193.
7. А.С. Черников, Е.В. Комелев, З.А. Шокина и др. Атомно-водородная энергетика и технология. М.: «Атомиздат», 1979, в. 2, с. 160-177.
8. А.С. Черников, В.С. Колосов, Л.Н. Пермяков и др. Конструкция и основные характеристики твэлов ВТГР // Атомно-водородная энергетика и технология. М.: «Энергоатомиздат», 1983, в. 5, с. 207-213.
9. В.Е. Иванов, В.Ф. Зеленский, В.А. Циканов и др. Дисперсионные тепловыделяющие и поглощающие элементы на основе графита на пироуглеродной связке для высокотемпературных газоохлаждающих реакторов // Реакторное материаловедение (Труды конференции по реакторному материаловедению, Алушта, 29 мая –1 июня 1978 г.). М.: ЦНИИАтоминформ, 1978, т. 6, с. 308-325.

10. A.I. Voloshuk, V.A. Gurin, N.P. Odeychuk, S.S. Chaika. Preparation of micro spherical fuel kernels for high-temperature gas-cooled reactors using mechanical spheroidization method // Specialist's meeting on gas-cool reactor fuel development and spent fuel treatment (Moscow, 18 – 21 October, 1983). Moscow, UССК, 1985, p. 133-137.
11. S.V. Alekseyev, V.A. Zaytsev and S.S. Tolstoukhov, Dispersionnoye yadernoye toplivo, (Tekhnosfera, Moskva, 2015), p. 135.
12. Гибридная ториевая реакторная установка с источником термоядерных нейтронов на основе магнитной ловушки = Hybrid thorium energy producing subcritical stand with a fusion neutron source based on a magnetic trap / А. В. Аржанников [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – [С. 43-54].
13. Дорофеев Ю.Г., Мариненко Л.Г., Устименко В.И. Конструкционные порошковые материалы и изделия. – М.: Металлургия, 1986. – 296 с.
14. Дорофеев Ю.Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. – М.: Металлургия, 1977. – 216 с.
15. Кукин П.П. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств: учеб. Пособие / П.П. Кукин, В.Л. Лапин – М., Высшая школа, 1999. – 318с.
16. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 № 181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07. – [С. 4]
17. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.
18. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983 01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.
19. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность.

20. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с.

**Приложение А**  
(справочное)

**The process of obtaining model fuel pellets**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM91	Цветков Алексей Дмитриевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОТЯЦ	Видяев Дмитрий Геннадьевич	д.т.н., профессор		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель ОИЯ	Шайкина Ольга Игоревна	–		

## **1 Introduction**

Existing nuclear energy technology in Russia uses thermal lightwater reactors (LWR), which have certain disadvantages. Additionally, according to scientific, technical, economic, and environmental considerations, it is impossible to fabricate a large-scale, balanced nuclear energy system based on the above-mentioned platform impossible. These reactors possess two major drawbacks: the low U use efficiency and the formation of a large number of minor actinides (e.g. Am, Cm and Cf) that must be dealt with during the uranium–plutonium fuel cycle stages. Ongoing exploratory research projects concerning the implementation of a new technological platform are based on the expanded reproduction of fuel in a closed fuel cycle and the physical principles of fast breeder RU. As a result, a strategy for generating nuclear power that does not require any structural improvements to existing reactors in the transition to thorium-containing fuel and enables the organisation of expanded fuel cycle reproduction is of great interest.

Today, Russian technology for implementing the thorium fuel cycle is innovative, but technically and economically underdeveloped due to the necessity of significant financial investments. However, given the potential benefits of a thorium cycle and the timeline of nuclear technology development and implementation, there is a demonstrated need for research concerning methods for employing thorium in both ongoing and new RU projects.

In previous studies, the authors examined the positive and negative features of thorium, allowing them to conduct an assessment of the effectiveness of thorium nuclear technology. They analyzed nuclear fuel containing thorium in various types of RUs and demonstrated the feasibility of using thorium fuel in industrially produced reactors. These studies concluded that the introduction of a thorium fuel cycle with fast breeder reactors and commercial LWRs is relevant in present-day Russia. In these units, upgrades to existing thermal generator fuel assembly designs are possible and, under certain conditions, permit replacement of conventional uranium fuel with thorium fuel. However, in innovative reactor designs, there are still

many scientific and engineering problems which should be solved before thorium fuel cycles can be implemented.

There have been a large number of projects that have investigated thorium as a possible fuel source. Intensive development toward this goal began in the mid-90 s, when the US Department of Energy recruited specialists from the National Research Centre Kurchatov Institute to work on the international Radkowsky Thorium Reactor project. In recent years, a number of innovative uses for thorium have been introduced. For example, authors studied LWR using numerical experiments, simulating various nuclear fuel assemblies with different thorium oxide fuels, submerged in the LWR core. The experiment used realistic loading patterns and fuel assembly permutations. The results showed the viability of using thorium-containing fuel in industrially produced LWR. The LWR operated on an open fuel cycle and the core life and the fuel burn-up reached the record values. The radiation hardening and brittleness of the construction materials limited the core life. In other studies, the authors examined 40 different designs for low- and medium-power reactors as well as innovative solutions that are currently in the design or licensing stages. Problems relating to thorium use in high-temperature, heavy water and light water reactors are currently being studied.

A promising direction in nuclear power development is the construction of low-power, high-temperature gas-cooled reactors (HTGR). In the last decade, the design and construction of low capacity modular HTGRs have commenced. Today, HTGRs are under development in the United States, Russia, Germany, France and Japan, which have well-developed nuclear energy programs. In studies, the authors note that the development of HTGR is also accelerating in Korea, China, India and South Africa. Full-scale numerical experiments on multivariate RU models are available in and other studies that examined structural designs and methods employed in calculations. These studies provide detailed descriptions of the reactor core construction and neutronic calculation methods.

The advantages of HTGRs include their higher nuclear safety compared to conventional designs, high efficiency (40%–50%), the absence of phase transitions in

the coolant, few problems in working surface corrosion, the use of a different fuel, overload during reactor operation and the simplified management of spent fuel. The main feature of HTGRs is the ability to generate hightemperature heat, which provides a range of applications for these reactors. The first HTGRs were developed for and implemented in operational models (1950–1960), but their commercial use in Russia as small modular reactors will not begin until 2020 at the earliest.

For Russia, a thorium fuel cycle based on domestic LWR- and BN-type sodium-cooled fast breeder reactor (e.g. BN-600, -800, -1200) is the most optimal method of nuclear energy development. Among the IV generation RUs, low-power Thorium Hightemperature Gas-cooled Reactor Units (HGTRU) (up to 100 MWth) are significant, such that their implementation in Russia offers considerable potential to nuclear energy development. The existing BN-type reactors (which never entered industrial production due to high costs) combined with Russia's vast experience in creating low power enables HGTRU technology to be rapidly introduced. Furthermore, HGTRUs offer clear advantages in for supplying energy to the large naval bases and remote military garrisons in the Arctic and Eastern Siberia. In these regions, HGTRUs are ideal sources of energy, heat and hydrogen and do not require large bodies of water or rivers. Furthermore, HGTRUs are safe, cheap and can be quickly constructed (compared to industrially produced LWR or BN). HGTRUs power can also be altered in accordance with the growth of regional energy consumption.

On a global scale, low-power thorium reactors and related technologies are among the most expensive proposals per unit of generated power. Such reactors should become the basis of regional energy in Russia other countries with high energy, heat and hydrogen demands. Thus, developing countries with relatively high levels of income, infrastructure and expanding business are suitable markets for HGTRU technology. Reactors of this type can be supplied without nuclear proliferation infringements concerns. We note that industrial production of HGTRU will reduce the cost of construction and make the technology more competitive. The economic effects of HGTRU industrial production will be seen in the mass

production of fuel, blocks and construction elements, as well as in the experience and knowledge acquired during use.

The main goal of this work is to study the neutronic characteristics of a low-power HGTRU with fuel blocks and pellets of different configurations. By conducting numerical experiments on the reactor physics using specialised software packages, the inconsistencies between nuclear physics constants (cross sections) of evaluated nuclear data files should be taken into consideration.

Few previous studies show inconsistencies between ENDF/B (USA), JEFF (Europe), JENDL (Japan), ROSFOND (RF) and other evaluated nuclear data files. Studies dealing with various reactor designs with thermal and fast-neutron spectrums using a uranium and plutonium fuel cycle demonstrated that the value of the effective neutron multiplication factor ( $k_{\text{eff}}$ ) and several other neutronic parameters are independent of the database selection.

Previous studies analysed the nuclear physics constants of evaluated and other nuclear data libraries. Innovative RU designs (e.g. high-temperature gas-cooled reactor, gas turbine modular helium-cooled reactor, breed-and-burn reactor) that operate on uranium and thorium fuel cycles are also studied. The need to adjust the nuclear data used in the calculation of  $k_{\text{inf}}(t)$  is demonstrated in the literature. Thus, while calculating the reactor core with thorium fuel, we must take into account inconsistencies between nuclear physics constants of evaluated nuclear data files.

To avoid obtaining erroneous results, we used verified WIMSD5B and MCU-5 calculation codes. The WIMS-D5B code is to calculate reactors of various types. WIMS-D5B uses a 69- group system of constants based on the ENDF/B evaluated nuclear data files. The ENDF/B (ENDF/B-V and later versions) data with satisfactory precision (30%–40%) is consistent with both the experimental and JENDL, JEFF, ROSFOND evaluated nuclear data. Most researchers recommend using ENDF/B to calculate  $k_{\text{inf}}(t)$  for thorium reactors.

The MCU-5 code was developed by National Research Centre Kurchatov Institute and is intended for modelling particle (e.g. neutrons, photons, electrons and positrons) transitions in any reactor using the Monte Carlo method. MCU-5 uses its

own data bank, MCU-DB50, while MCUDB includes the ACE/MCU and BNAB/MCU nuclear files. ACE/MCU is a point-wise representation of neutronic constants based on evaluated nuclear data files (ENDF/B, JEFF, JENDL, ROSFOND) and BNAB/MCU is an expanded and modified version of the BNAB-93 26-group system of constants. We note that ROSFOND includes cross-section data of neutron interactions with thorium isotopes from JENDL-3.3, ENDF/B-VIIb2, JEFF-3.1 and EAF-2003, as well as experimental data from the Evaluated Nuclear Structure Data File (ENDFSF) and Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR). The main source of ROSFOND is the ENDF/B, and JENDL evaluated nuclear data files.

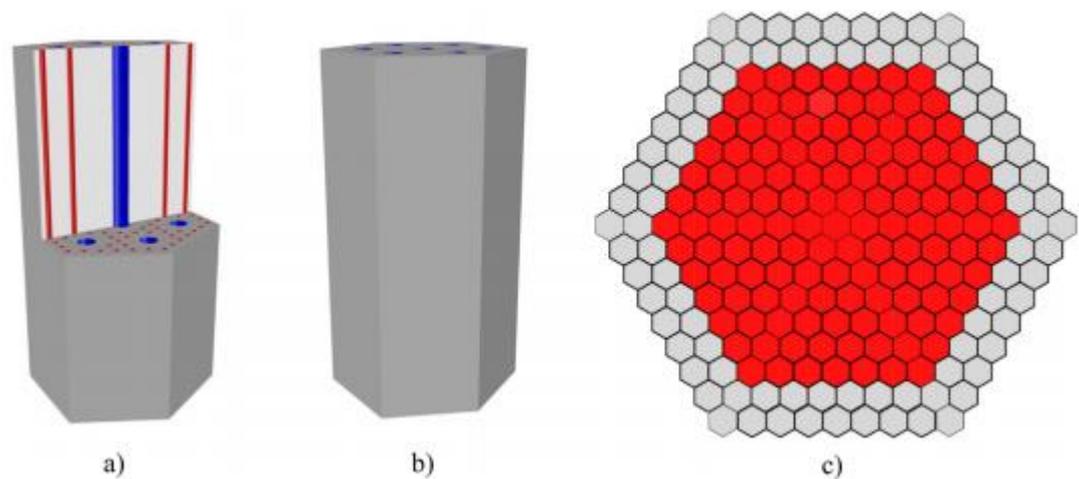


Fig. 1 Fuel block and cross-section of the HGTRU core a) fuel block; b) graphite block (reflector) and c) cross-section of the core

## 2 Computational model of a high-temperature, gas-cooled thorium reactor core

### 2.1 Core and fuel block

Typically, current HTGR fuel blocks are dense, high-quality graphite treated at between 3000 K and 3300 K with channels for accommodating the fuel cells and the coolant passage. The core of the modelled HGTRU (Fig. 1) is made of hexagonal graphite fuel blocks (Fig. 1a) with small-diameter and large-diameter channels for fuel pellets and helium, respectively. The core (Fig. 1c) is surrounded by two rows of

graphite blocks of the same configuration (Fig. 1b), but without fuel openings. The core is enclosed by a single row of graphite blocks (Fig. 2).

## **2.2 Micro-encapsulated fuel and pellet**

Microencapsulated fuel (MF) for HTGRs is a kernel of fissile material with layers of functional coatings. Pyrolytic carbon (PyC) with a graded density, silicon carbide (SiC), zirconia (ZrC) and other ceramic nanolaminate materials are used as functional coatings. As a rule, the choice of MF configuration depends on the reactor operating mode and economic considerations. A technical solution based on two-layer coatings simplifies MF production procedures and significantly reduces the fuel production cost.

A previous study employed a two-layer coating for the HGTRU MF. The first layer (inner coating) is PyC, and the second layer (outer coating) is SiC. A temperature of  $\sim 1200$  K and a fast-neutron fluence of  $\sim 10^{25}$  m<sup>-2</sup>, limit the service life of this MF type. The disadvantage of this MF type is a short service life associated with coating vulnerability due to irradiation and temperature stresses. The limited service life of the MF is also associated with the migration tendency of the fuel core, forming cracks in the coatings. Plutonium fuel composition generally characterise this tendency.

In the present study, we used an MF with a two-layer functional coating of fuel microspheres. This particular MF has a longer service life due to a carbide titan silicate (Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>) outer layer. The introduction of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> as a secondary coating layer significantly lowers the stress on the load-bearing coating due to radiation and thermal creep of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>. Thus, the outer layer has a lower likelihood of accumulating tensile stress, resulting in less damage to the layer.

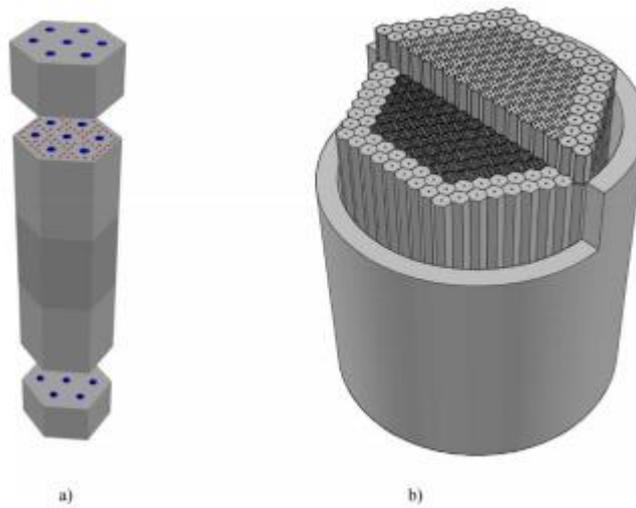


Fig. 2 HGTRU core design a) fuel block and graphite block (reflector) and b) core

This study uses a MF with a diameter of 600 mm (Fig. 3) and a spherical fuel kernel, coated with successive layers of PyC and  $Ti_3SiC_2$ , dispersed in a graphite matrix of cylindrical fuel pellets (Fig. 2a). The cylindrical fuel pellets were placed in a fuel block (Fig. 2). The fuel block includes 78 channels with a small diameter for fuel pellets of different configurations and 7 larger-diameter channels for helium. The width and height of the hexagon are 0.2 m and 0.8 m, respectively. The width of the hexagonal graphite block that encloses the core is 0.2 m and its height is 0.3 m.

Three types of fuel pellet with identification codes 0817, 1017 and 1200 were used in the study. Fig. 3 shows the 0817 fuel pellet, which was used in the first stage of calculations. The diameters of the 0817, 1017 and 1200 fuel pellets are to  $8.17 \cdot 10^{-3}$ ,  $10.17 \cdot 10^{-3}$  and  $12.00 \cdot 10^{-3}$  m, respectively. The height of the fuel pellets ( $20 \cdot 10^{-3}$  m) and the thickness of the SiC layer (300  $\mu$ m) are identical in all pellet types. Additionally, a thorium-plutonium fuel composition was used as the fissile material.

The PyC layer was used to localise the gaseous fission products, compensate for inconsistencies in the linear thermal expansion coefficients of the fuel core and the Ti layer  $Ti_3SiC_2$  and – as the first diffusion barrier – protecting the  $Ti_3SiC_2$  layer from damage due to solid fission products. The  $Ti_3SiC_2$  layer has excellent

mechanical and thermal characteristics and was the main load-bearing coating and a diffusion barrier with respect to the solid fission products. The graphite matrix and the SiC coating on the surface formed an additional barrier.

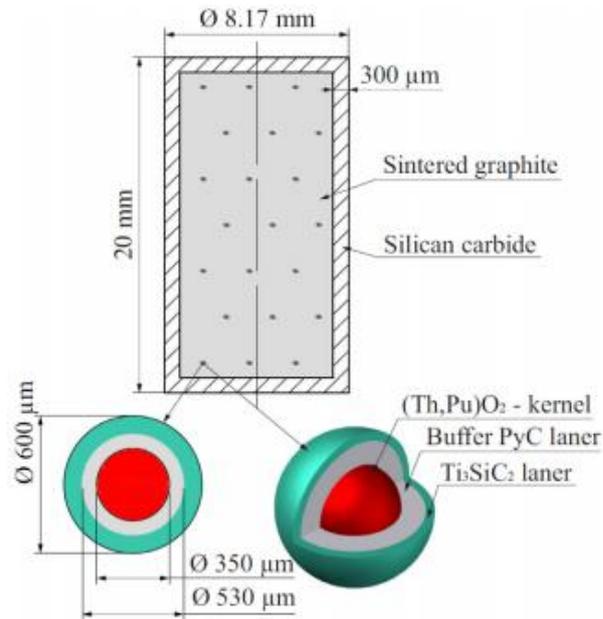


Fig. 3 Micro-encapsulated fuel and fuel pellets

The plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) method can be used to create the coating. This technology was developed in the National Research Tomsk Polytechnic University and enables the application of coatings to spherical cores with diameters between 350 and 800 mm and cylindrical pellets with diameters of  $8-12 \cdot 10^{-3}$  m and heights of up to  $15 \cdot 10^{-3}$  m. The advantage of this method, as opposed to the existing technology, is the high-speed application of coatings ( $\geq 0.003$   $\mu\text{m}/\text{c}$ ) and the option of using protective coatings made from metallic materials as well as materials having extreme strength, such as diamonds.

The MF specifications and conditions of use are provided in Table 1. Computations and numerical experiments were conducted using WIMS-D5B and MCU-5 computation codes. The computational models used in the test reactor were as follows:

Table 1

Technical specifications of the microencapsulated fuel and its operating conditions.

Specification	Value
Micro-encapsulated fuel	BISO(Th,Pu)O <sub>2</sub>
Diameter of fuel kernel (μm)	350
Thickness of inner PyC coating (μm)	90
Thickness of outer Ti <sub>3</sub> SiC <sub>2</sub> coating (μm)	35
Service life of microencapsulated fuel	
Fast-neutron fluence (m <sup>-2</sup> )	~0,6·10 <sup>26</sup>
Temperature (K)	1250

1. The computational model of a reactor core cell. This model is comprised of a fuel pellet, graphite moderator and coolant gas (Fig. 4a).

2. The computational model of a cluster-type reactor core cell. This model is comprised of a graphite block, fuel cells and gas cells (Fig. 4b).

### 2.3. Computational model of a reactor core cell

A computational model of a reactor core cell was created using MCU-5 software. The geometry module in this software allows for modelling of three-dimensional systems with arbitrarily shaped geometries using combinatorial approach. The code provides approximately 20 simple bodies (e.g. spheres, parallelepipeds and cylinders), half-spaces and planes that can be combined using intersection, union and complement operations. Geometrical zones are constructed from the bodies by the above-mentioned combinatorial geometry methods.

A detailed 3D reactor core cell model was constructed and comprised fuel pellets, a heterogeneous specification of fuel cores, their surrounding graphite moderators and coolant gas. Fig. 3 shows the configuration used to create the computational model. As the MF coating is made from materials with cross-sections without significant resonance peaks, partial homogenisation was used. In this

approach, validated by previous research, the fuel core coatings are homogenised with a graphite matrix. The homogenisation of the fuel core itself is an unacceptable approach and immediately causes significant deviations of  $k_{\text{eff}}$  (up to 7000 – 8000 pcm) from modelling and experimental results.

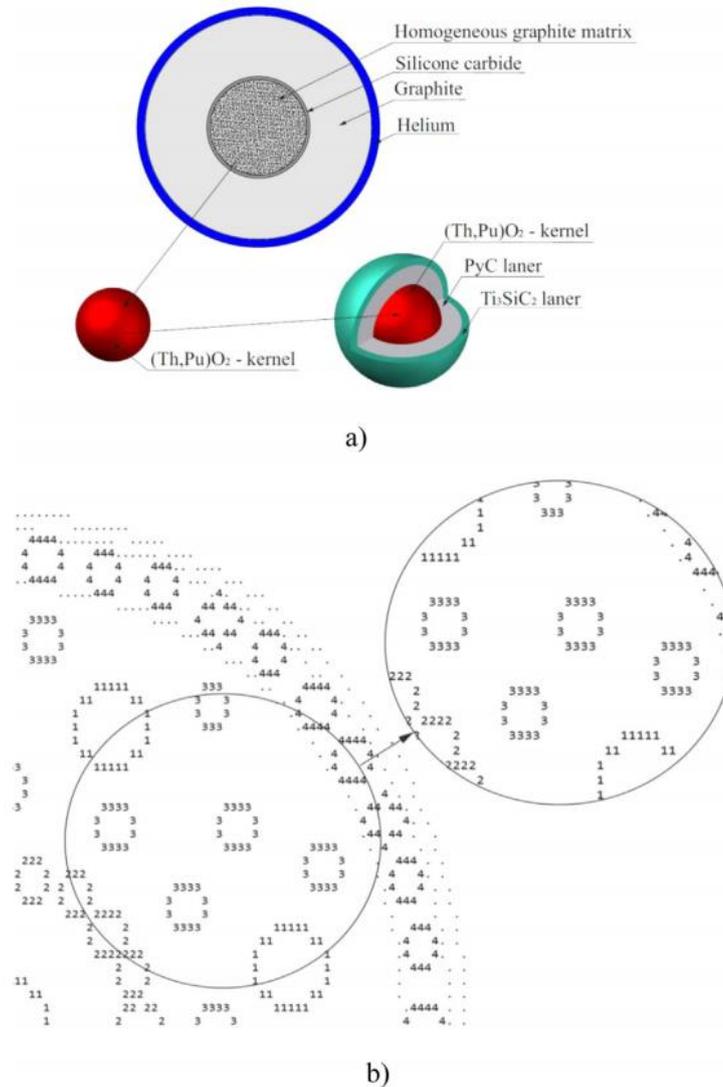


Fig. 4. HGTRU computational model a) computational 3D model of an HGTRU reactor core cell for the MCU-5 code and b) computational 2D model of a HGTRU cluster-type reactor core cell for the WIMSD5B code (1 – coolant channels, 2,3,4 – fuel pellets).