

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 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование работы генератора ДТ-нейтронов в стационарном и импульсно-периодическом режимах работы

УДК 539.125.52:621.039.564

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM92	Полозков Сергей Дмитриевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Беденко С.В.	канд. физ.-мат. наук		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Т.Г.	канд. экон. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю.В.	канд. техн. наук		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные реакторы и энергетические установки	Кузнецов М.С.	канд. техн. наук		

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b><i>Универсальные компетенции</i></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 организовать 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 определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
<b><i>Общепрофессиональные компетенции</i></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><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
ПК(У)-1	Способность к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий
ПК(У)-2	Готовность применять методы исследования и расчета процессов, происходящих в современных физических установках и устройствах в области ядерной физики и технологий
ПК(У)-3	Готовность разрабатывать практические рекомендации по использованию результатов научных исследований
ПК(У)-4	Способность оценивать риск и определять меры безопасности для новых установок и технологий, составлять и анализировать сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения
ПК(У)-5	Способность к анализу технических и расчетно-теоретических разработок, к учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности и другим нормативным актам
ПК(У)-6	Способность объективно оценить предлагаемое решение или проект по отношению к современному мировому уровню, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-7	Способность 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	Способность провести расчет, концептуальную и проектную проработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-9	Готовность применять методы оптимизации, анализа вариантов, поиска решения многокритериальных задач, учета неопределенностей при проектировании
ПК(У)-10	Способность решать задачи в области развития науки, техники и технологии с учетом нормативного правового регулирования
ПК(У)-11	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-12	Способность к проектированию и экономическому обоснованию инновационного бизнеса, содержания, структуры и порядка разработки бизнес-плана

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 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Кузнецов М.С.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0AM92	Полозкову С.Д.

Тема работы:

Исследование работы генератора ДТ-нейтронов в стационарном и импульсно-периодическом режимах работы	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	34-51/с от 03.02.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	18.06.2021
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Размеры активной зоны (размер под ключ × высота), см: 280 × 240</li> <li>- Топливо: смешанный диоксид плутоний-торий</li> <li>- Тепловая мощность установки, МВт: 60</li> <li>- Интегральная мощность дополнительного источника нейтронов, н/с: <math>5,6 \cdot 10^{17}</math></li> <li>- Количество топливных блоков: 91</li> <li>- Замедлитель: графит</li> <li>- Теплоноситель: гелий</li> </ul>
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Создание расчетной модели при помощи Serpent 2.31</li> <li>- Расчет пространственно-временных характеристик</li> <li>- Расчет стационарных нейтронно-физических характеристик</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Проведение нейтронно-физической оптимизации активной зоны</li> <li>- Расчет компенсации избыточной реактивности</li> <li>- Расчет топливной кампании</li> <li>- Сравнение и анализ результатов</li> </ul>
<b>Перечень графического материала</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Презентация</li> <li>- Блок-схема</li> </ul>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Трубченко Т.Г.
Социальная ответственность	Передерин Ю.В.

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языке:**

1 Теоретическая часть
2 Построение модели
3 Расчетная часть
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение
5 Социальная ответственность

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	15.03.2021
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Беденко С.В.	канд. физ.-мат. наук		15.03.2021

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ92	Полозков Сергей Дмитриевич		15.03.2021



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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0AM92	Полозкову Сергею 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 / Ядерные реакторы и энергетические установки

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

1 Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Оклад руководителя – 36174 руб. Оклад исполнителя – 18426 руб.
2 Нормы и нормативы расходования ресурсов	Накладные расходы – 10 % Районный коэффициент – 30 % Норма амортизации – 33,3 %.
3 Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды составляют 30 %

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

1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Анализ конкурентных технических решений; SWOT-анализ
2 Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Планирование работ Разработка графика Ганта Формирование бюджета затрат на проектирование
3 Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Описание потенциального эффекта

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

1. Оценка конкурентоспособности НТИ
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НТИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	15.03.2021
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Т.Г.	канд. экон. наук, доцент		15.03.2021

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0AM92	Полозков Сергей Дмитриевич		15.03.2021

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0AM92	Полозкову Сергею Дмитриевичу

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

Тема ВКР:

Исследование работы генератора DT-нейтронов в стационарном и импульсно-периодическом режимах работы	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Расчетная модель генератора DT-нейтронов Область применения – Ядерная энергетика
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <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>- СНиП 41-01-2003;</li> <li>- ТОИ Р-45-084-01;</li> <li>- ГОСТ 12.1.038-82;</li> <li>- Технический регламент о требованиях пожарной безопасности</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<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> </ul>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<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>
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
15.03.2021	

Задание выдал консультант:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю.В.	канд. техн. наук		15.03.2021

Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0AM92	Полозков Сергей Дмитриевич		15.03.2021

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 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла  
 Период выполнения Весенний семестр 2020 /2021 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	18.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
18.03.2021	<i>Составление и утверждение технического задания</i>	
24.03.2021	<i>Выбор направления исследований</i>	
01.04.2021	<i>Подбор и изучение материалов по теме</i>	
04.04.2021	<i>Календарное планирование работ по проекту</i>	
12.04.2021	<i>Построение геометрической модели</i>	
18.04.2021	<i>Расчет материального состава</i>	
23.04.2021	<i>Моделирование пространственно-временных параметров</i>	
29.04.2021	<i>Стационарный нейтронно-физический расчет</i>	
08.05.2021	<i>Нейтронно-физическая оптимизация</i>	
14.05.2021	<i>Расчет динамических характеристик</i>	
27.05.2021	<i>Моделирование кампании топлива</i>	
01.06.2021	<i>Оценка эффективности полученных результатов</i>	
12.06.2021	<i>Составление пояснительной записки по проекту</i>	
18.06.2021	<i>Сдача работы</i>	

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Беденко С.В.	канд. физ.-мат. наук		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Кузнецов М.С.	канд. техн. наук		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная 90 с., 16 рис., 29 табл., 36 источников, 21 формулу, 2 приложения.

Ключевые слова: гибридный «синтез-деление» реактор, торийсодержащее топливо, плазменный источник ДТ нейтронов, импульсно-периодический режим работы, «волна» делений.

Объектом исследования является расчетная модель генератора ДТ-нейтронов.

Цель работы – проведение моделирования работы генератора ДТ-нейтронов в стационарном и импульсно-периодическом режимах работы.

В процессе исследования проводились расчеты пространственно-временных и стационарных нейтронно-физических характеристик исследуемой установки, выполнялась оптимизация нейтронно-физических параметров, рассчитывалось влияние поглотителей на размножающие свойства среды и изменение режима работы установки с выгоранием топлива.

В результате исследования определены нейтронно-физические параметры на всех предполагаемых этапах эксплуатации реакторной установки.

Основные конструктивные и технологические характеристики: тепловая мощность реакторной установки составляет 60 МВт, активная зона набирается из блоков унифицированной конструкции. Топливо представляет собой диспергированные в графитовой матрице микротвэлы типа BISO с ядром  $(\text{Th-Pu})\text{O}_2$ , процентное содержание Pu – 50 %.

Область применения: региональная атомная энергетика, электро- и теплоснабжение удаленных районов, производство водорода, конструкторские бюро.

## Содержание

Введение.....	11
1 Характеристики ADS систем.....	14
1.1 Общие сведения.....	14
1.2 Проект MYRRHA.....	21
1.3 Проект CLEAR.....	23
1.4 XT-ADS и EFIT.....	24
1.5 Прочие проекты.....	25
2 Модель исследуемой установки.....	26
2.1 Геометрическая модель.....	26
2.2 Расчетная модель.....	29
3 Результаты моделирования.....	33
3.1 Пространственно-временные характеристики.....	33
3.2 Стационарные нейтронно-физические характеристики.....	35
3.3 Нейтронно-физическая оптимизация активной зоны.....	37
3.4 Компенсация излишней реактивности blankets установки.....	39
3.5 Нестационарные изменения реактивности.....	41
3.5.1 Температурный эффект реактивности.....	41
3.5.2 Расчет топливной кампании.....	42
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	48
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. .	48
4.2 Анализ конкурентных технических решений.....	49
4.3 SWOT-анализ.....	51
4.4 Планирование выполнения работ по проекту и формирование бюджета проектной работы.....	53
4.5 Расчет трудовых затрат на проектирование.....	54
4.6 Бюджет научного исследования.....	58

4.6.1 Расчёт материальных затрат.....	58
4.6.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных работ....	59
4.6.3 Заработная плата исполнителей.....	60
4.6.4 Отчисления во внебюджетные фонды.....	62
4.6.5 Накладные расходы.....	63
4.6.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	63
4.7 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	64
4.8 Выводы по разделу.....	65
5 Социальная ответственность.....	67
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. .	68
5.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны исследователя.....	68
5.3 Производственная безопасность.....	69
5.3.1 Повышенный уровень электромагнитного излучения.....	70
5.3.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	71
5.3.3 Превышение уровня шума.....	72
5.3.4 Отклонение показателей микроклимата.....	73
5.3.5 Психофизиологические факторы.....	74
5.3.6 Поражение электрическим током.....	75
5.3.7 Пожарная и взрывная безопасность.....	78
5.4 Чрезвычайные ситуации.....	80
5.5 Выводы по разделу.....	81
Заключение.....	83
Список публикаций студента.....	84
Список литературы.....	86
Приложение А.....	91
Приложение Б.....	102

## Введение

В современном развивающемся мире с каждым годом все больше возрастают потребности в энергетических ресурсах. Ограниченность ресурсов полезных ископаемых определяет необходимость наиболее эффективного использования сырья, что в наибольшей степени относится к сырьевому обеспечению электрогенерирующих систем. Помимо этого, растет необходимость разработки месторождений в удаленных и труднодоступных районах земного шара. В ближайшем будущем в решении этих проблем самым эффективным средством могут стать ядерно-энергетические технологии.

Ядерная энергетика занимает значимую долю в энергообеспечении всех развитых стран. Уникальные особенности атомных электростанций позволяют говорить о генерации электроэнергии и тепла на них как о самом «чистом» и эффективном способе получения электроэнергии. Наибольшее распространение в мире получили реакторы на тепловых нейтронах, использующие легкую воду в качестве теплоносителя, так называемые – легководные реакторы. Такие реакторы, в подавляющем большинстве, используют в качестве топлива уран, технология получения и обработки которого является хорошо отработанной.

В процессе работы ядерного реактора, топливо находится в жестких радиационных полях, что приводит к образованию большого количества минорных актиноидов (Am, Cm, Cf), это обстоятельство значительно затрудняет работу с отработанным ядерным топливом. В различных российских и зарубежных научных трудах неоднократно показано, что ядерное топливо, в котором в качестве воспроизводящего (сырьевого) нуклида используется  $^{232}\text{Th}$  имеет ряд существенных преимуществ над урановым топливом (воспроизводящий нуклид –  $^{238}\text{U}$ ), одним из которых является меньшая удельная активность отработанного ядерного топлива. Однако, несмотря на то, что разработка и исследование ториевого ядерного-топливного цикла в России осуществляется уже довольно продолжительное время – технически и экономически данное направление не получило должного

развития, так как требует большого количества инвестиций. Тем не менее, необходимость в разрабатываемых технологиях может появиться уже в ближайшее время, так как темп расходования уранового сырья непрерывно растет в связи со строительством новых электростанций. Дальнейшая разработка и исследование ториевого ядерного топливного цикла позволит финансово и экономически обозначить преимущества топлива на основе тория, и тем самым привлечь новые инвестиции.

Высокотемпературный ториевый реактор со съемом тепловой энергии потоками гелия представляется наиболее подходящим для применения в северных малонаселенных и труднодоступных регионах Российской Федерации. Для получения от такого реактора тепловой мощности на уровне 60 МВт плотность нейтронного потока в критической сборке активной зоны реактора должна составлять  $(3-4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в стационарном режиме его работы. Основная особенность выработки энергии с использованием ториевого топлива состоит в нехватке нейтронов на каждом цикле цепной ядерной реакции, что вынуждает привлекать источник дополнительных нейтронов, поступающих в бланкет реактора. Таким источником дополнительных нейтронов может служить процесс слияния тяжелых изотопов водорода (дейтерия и трития) в плазме при высокой температуре.

В работе исследуются особенности пространственной кинетики инновационной гибридной ядерной энергетической установки с протяженным источником нейтронов на основе магнитной ловушки. Исследуемая установка «синтез-деление» включает в себя реакторную установку, активная зона которой состоит из сборки торий-плутониевых топливных блоков унифицированной конструкции и длинной магнитной ловушки, которая пронизывает приосевую область активной зоны. В исследуемой конфигурации гибридной установки высокотемпературный плазменный шнур GDT-FNS образуется в импульсно-периодическом режиме, и при определённой скважности следует ожидать образование расходящейся от осевой части



системы «волны» деления, распространяющейся по объёму сборки топливных блоков в корреляции по времени с импульсным источником быстрых DT-нейтронов. В этих условиях возникает необходимость исследования процесса распространения «волны» деления и, соответственно, формирования распределения энерговыделения в объёме blankets установки.

Цель работы: провести исследование работы генератора нейтронов в стационарном и импульсно-периодическом режимах работы. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- а) выбрать константное обеспечение и создать расчетную модель установки;
- б) исследовать импульсно-периодический и стационарный режим работы DT-генератора;
- в) выполнить нейтронно-физическую оптимизацию blankets установки;
- г) выполнить моделирование движения органов системы управления и защиты.

Актуальность работы: подкритические системы с внешним источником нейтронов являются наиболее приемлемыми реакторными установками с точки зрения безопасности эксплуатации, что обусловлено мгновенным затуханием цепной самоподдерживающейся реакции деления в случае отключения питания источника. Повышение безопасности и устойчивости атомных электростанций является актуальной задачей для современного этапа развития ядерной энергетики.

Практическая значимость работы: разработана методика расчета нейтронно-физических функционалов реакторной установки с внешним источником нейтронов. Приведенный расчет может служить основой для проектирования реакторов с внешним источником нейтронов.

# 1 Характеристики ADS систем

## 1.1 Общие сведения

Подкритический реактор, управляемый ускорителем (energy amplifier или accelerator-driven system – ADS) – это тип энергетического ядерного реактора, состоящего из подкритического реактора и высокоэнергетического ускорителя, который служит для получения нейтронов, вызывающих реакцию деления, в результате которой выделяется достаточно энергии, чтобы питать ускоритель и получать дополнительную энергию. [1]

Идея использования сильноточных ускорителей в сочетании с подкритическими реакторами для получения энергии была предложена Бауманом и несколько позже К. Руббиа.

Нейтроны в ADS получают путем попадания пучка протонов в мишень из тяжелых элементов. Такая реакция требует энергии протонов выше нескольких сотен МэВ. При энергии пучка 1 ГэВ с одного падающего протона образуется примерно 20-30 нейтронов. Оптимальная энергия пучка составляет 2-4 ГэВ [2]. Количество нейтронов, производимых на один протон пучка, зависит от профиля пучка, энергии протонов, материала мишени, размера и геометрии [3]. Кроме того, количество нейтронов увеличивается за счет процесса деления [1].

При этом недостаточно исследованы возможности использования пучков легких ионов вместо протонов. В работе [4] утверждается, что ядра тяжелее трития плохо подходят для создания ADS систем, при этом в работе [5] показано, что наиболее эффективными будут ядра использования ядер  $Ne^{20}$  с энергией около 3 ГэВ/нуклон, что согласуется с результатами [2]. Кроме того, при использовании легких ядер происходит снижение радиационной нагрузки на конструкционные элементы ускорителя.

На рисунке 1 изображена зависимость количества нейтронов, появляющихся в результате реакции расщепления от угла между ними и протонами, инициирующими реакцию [6].

Как видно из рисунка 1, большая часть нейтронов рождается с направлением относительно совпадающим с направлением протонов.

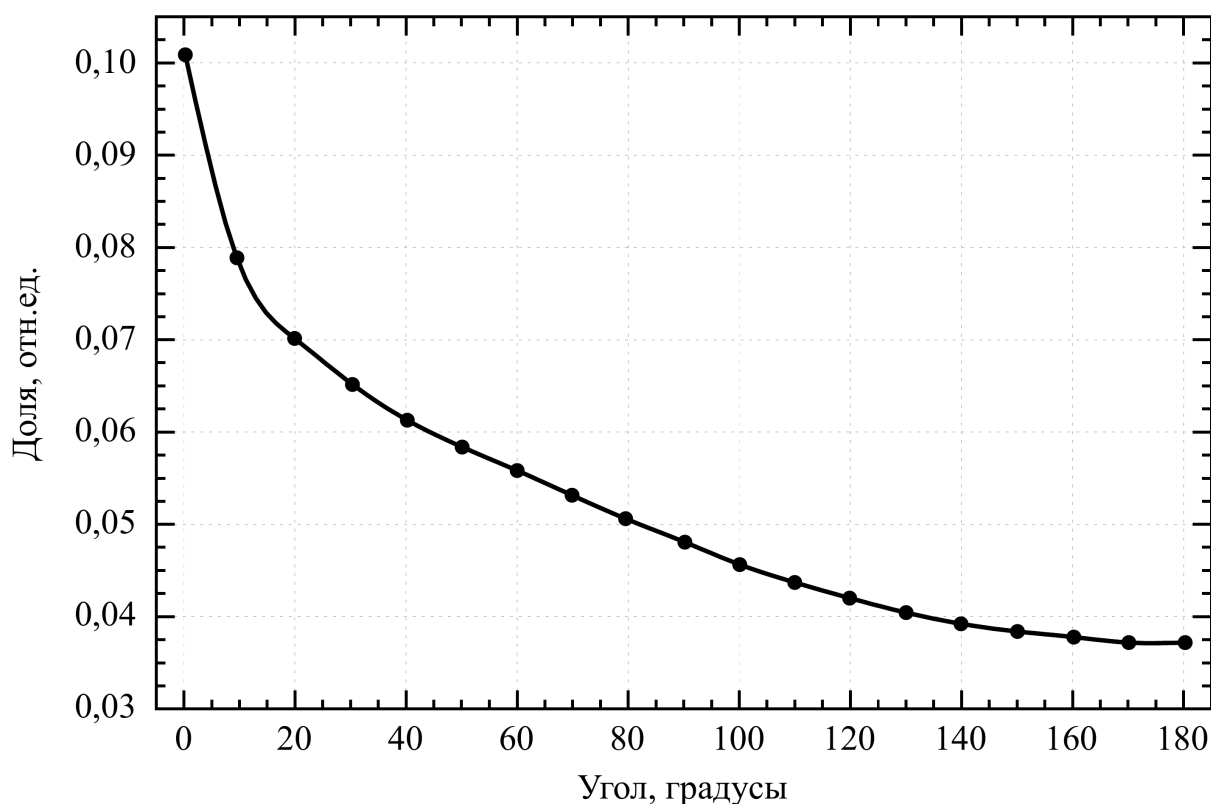


Рисунок 1 – Угловое распределение нейтронов

В случае критического реактора существует равновесие между потерями нейтронов и их увеличением за счет размножения. Такое установившееся состояние может быть также получено в подкритической сборке при наличии внешнего источника нейтронов. В этом случае подкритическая сборка увеличивает количество исходных нейтронов в  $n$  раз [7]:

$$n = \frac{1}{1 - k_{eff}} \quad (1)$$

где  $n$  – умножение нейтронов;

$k_{eff} < 1$  – эффективный коэффициент размножения нейтронов.

Общее количество нейтронов контролируется мощностью внешнего источника. Это является концептуальным преимуществом ADS, мощность которого определяется исключительно интенсивностью протонного пучка (при

постоянном уровне подкритичности). На практике уровень подкритичности такой системы лежит в диапазоне от 0,95 до 0,98.

Ток управляющего пучка протонов определяется по формуле:

$$I_b = \frac{(1-k)P}{n f E_f}, \quad (2)$$

где  $P$  – тепловая мощность реактора;

$f$  – доля нейтронов, вызывающих деление;

$E_f$  – количество энергии, выделяемое при одном делении.

ADS-система состоит из трех основных компонентов: ускорителя заряженных частиц высоких энергий, мишенного блока и подкритического blankets. При этом изучение взаимосвязи между ускорителем и мишенным блоком, а также подкритическим реактором является достаточно сложной проблемой [8].

На рисунке 2 схематически показано устройство ADS. В его состав входят: высокоэнергетичный протонный ускоритель с энергией  $\sim 1$  ГэВ и током  $\geq 10$  мА, мишень из тяжелых элементов (Pb, W, U), подкритичная активная зона, где происходит деление под действием быстрых нейтронов, тепловых нейтронов или их комбинации. Согласно расчетами, проведенных в [9], свинцовая мишень оказывает очень незначительное влияние на реактивность активной зоны, поглощая лишь 0,19 % нейтронов, находящихся в активной зоне.

Свинцовый теплоноситель обладает преимуществами низкого рабочего давления, значительной экономии нейтронов, высокой выходной температуры. Более того, ожидается, что реактор со свинцовым охлаждением станет первой ядерной системой четвертого поколения для промышленной демонстрации и коммерческого применения. По сравнению с ядерной системой с натриевым реактором на быстрых нейтронах, эвтектика свинца-висмута имеет более высокую температуру кипения, лучшие пассивные характеристики и лучший

потенциал миниатюризации активной зоны, что может дополнительно значительно снизить свинцовую коррозию материалов установки [8].

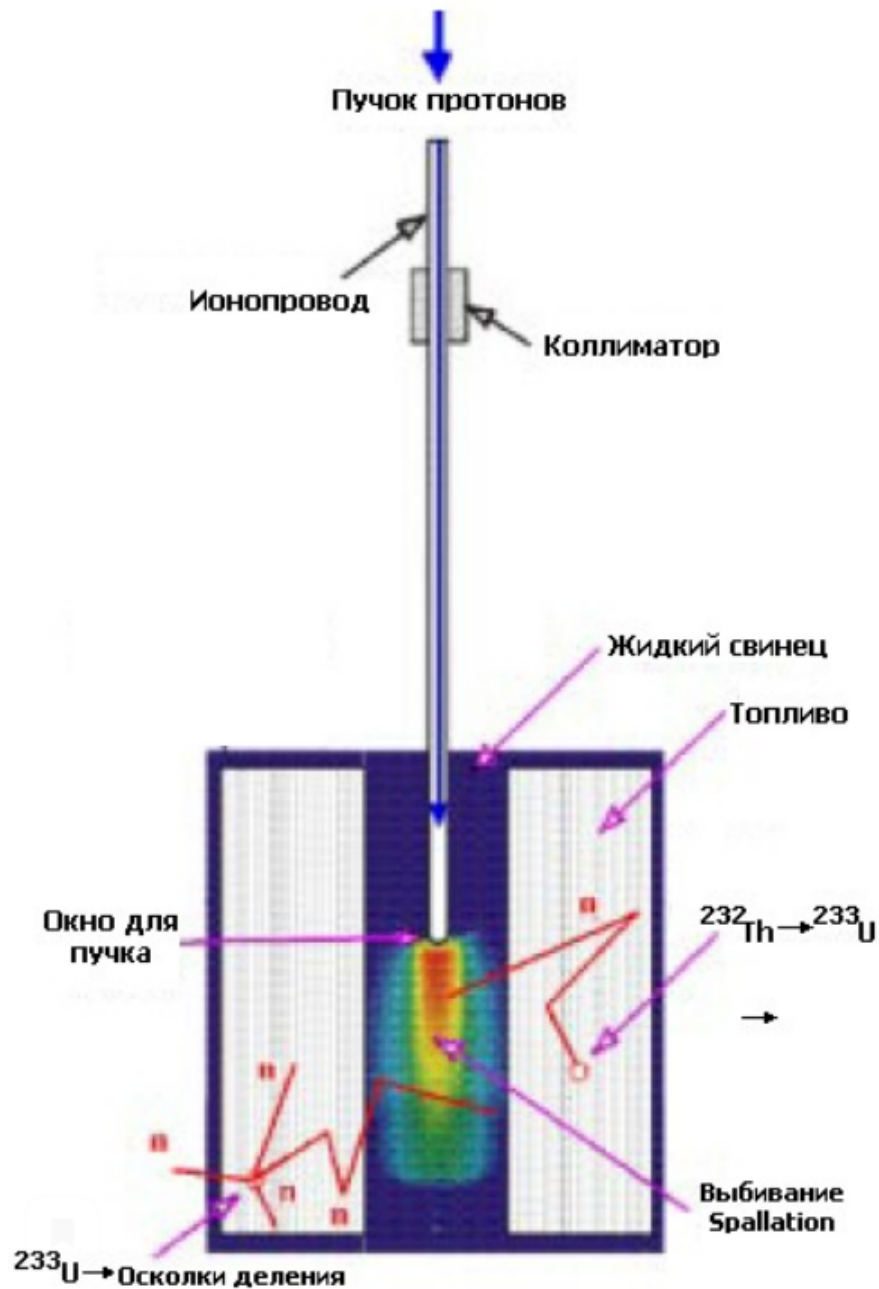


Рисунок 2 – Схема устройства подкритичного реактора, управляемого ускорителем

В результате реакции из мишени вылетают нейтроны, которые вызывают цепные реакции в активной зоне. За исключением высокоэнергетической части, спектр нейтронов не сильно отличается от спектра нейтронов деления.

В критических сборках можно достичь эффективной трансмутации минорных актинидов. Однако из-за малой доли запаздывающих нейтронов, создается проблема управления и безопасности в таких сборках. В быстрых реакторах для обеспечения безопасности при сжигании минорных актинидов приходится добавлять в топливо уран или торий [1]. Концепция ADS предоставляет альтернативу данному решению. Подкритическая сборка управляется через интенсивность внешнего источника, а не через регулировку реактивности. Когда ускоритель выключен процесс деления прекращается. Следовательно, с точки зрения безопасности, можно допустить гораздо более высокое содержание минорных актинидов [8].

ADS хорошо приспособлен для сжигания топлива, которое производит небольшое количество запаздывающих нейтронов, и в критических реакторах привести к плохому управлению уровня критичности. В ADS в принципе можно сжигать чистые минорные актиниды, причем многократно, пока они полностью не сгорят. Это в сотни раз уменьшает их содержание в отходах по сравнению с отходами при однократном цикле.

Электроядерный метод генерации нейтронов, основанный на использовании ядерной реакции расщепления ядер-мишеней тяжелых элементов ускоренными до высоких энергий (1–1,5 ГэВ) протонами, является альтернативой методам, использующим реакции синтеза  $T(d,n)$  и деления  $(n, f)$ . Теоретические исследования данного метода и эксперименты над ним начались в 1949 г. проектом МГА в Радиационной лаборатории Лоуренса в Ливерморе и с середины 60-х – в СССР (ОИЯИ, Дубна). [1]

Сначала целью было получение вторичного делящегося ядерного материала по уран-плутониевой или торий-урановой схеме. Когда надобность в электроядерном способе производства такого материала отпала, целью данных установок стала генерация нейтронов. После, эти установки ориентируются на уничтожение радиоактивных отходов АЭС в комплексе с генерацией

вторичного топлива из естественного урана или тория, использование которого позволило бы компенсировать затраты на уничтожение радиоактивных отходов. Среди различных схем электроядерного производства энергии рассматривался ядерный реактор на естественном уране, управляемый ускорителем протонов LADR (Linear Accelerator Driven Reactor) с глубоко подкритичной активной зоной ( $k_{eff} = 0,9$ ). Коэффициент усиления мощности, вводимой в активной зоне такого реактора, достигал  $\sim 5$  и оценивался соотношением:

$$P = 1 + \frac{E_f}{E_p} \cdot \frac{k_{eff}}{1 - k_{eff}} \cdot \frac{n}{v} \cdot \eta_p \cdot \eta_y, \quad (3)$$

где  $E_f$  и  $E_p$  – энергия деления ( $\sim 200$  МэВ) и протонов соответственно;

$n$  – количество нейтронов в расчете на один протон, рождаемых в мишени-конверторе;

$v$  – количество нейтронов на акт деления;

$\eta_y$  и  $\eta_p$  – к.п.д. ускорителя и реактора соответственно;

В настоящее время все разрабатываемые концепции таких систем в CERN, JAERI, CEA, LANL и т.д. базируются на быстром спектре нейтронов в подкритической сборке.

Умножение нейтронов подкритическим blanketом позволяет снизить энергию ускоряемых протонов и ток пучка ускорителя, генерирующего нейтроны в активной зоне реактора. Кроме того, становится менее важным КПД генерации протонов ускорителем. Энергетическая стоимость генерируемых в подкритическом blanketе нейтронов оказывается достаточно низкой, чтобы компенсировать энергетические затраты на ускорение первичных частиц. Уменьшение энергии протонов до  $\sim 200$ – $300$  МэВ позволяет получить практически изотропное распределение нейтронов из конвертора в активную зону, не отличающееся по энергетическому распределению от спектра нейтронов деления. Это исключает необходимость формирования энергетического спектра нейтронов от мишени-конвертора с помощью

специальных замедлителей. В спектре нейтронов, генерируемых протонами с  $E_p = 300$  МэВ, 89 % нейтронов имеют энергию менее 15 МэВ [8].

Основным требованием к ускорителю является режим работы, совместимый с установившимся режимом работы реактора, т.е. пучок должен работать непрерывно. Однако стационарное состояние необходимо периодически нарушать, чтобы контролировать уровень реактивности. С этой целью предусматривается прерывание пучка длительностью около 200 мкс для отслеживания реактивности [3]. Прерывания имеют длительность соответствующую 4-5 периодам реактора и происходят с частотой более 1 Гц.

В демонстрационных сборках разрабатываемых систем мощность пучка составит около 1 МВт, а его ток – 4 мА. В промышленных установках ток будет достигать 20 мА.

В качестве используемого ускорителя на сегодняшний день наиболее перспективным является сверхпроводящий линейный ускоритель. Основными аргументами в пользу линейного ускорителя являются пропускная способность пучка по току, возможность модернизации, модульность. Основными преимуществами сверхпроводимости являются компактность, потребляемая мощность при работе в непрерывном режиме.

Подкритические системы, управляемые ускорителями заряженных частиц высоких энергий, рассматриваются как наиболее перспективные для решения ключевых проблем атомной энергии:

- а) безопасность АЭС и установок ядерного топливного цикла;
- б) экологические проблемы, в том числе связанные с захоронением радиоактивных отходов и использованием отработавшего ядерного топлива;
- в) ограниченные запасы уранового топлива.

Для реализации ADS-систем необходимо решить ряд физических и технических задач:

- а) выбрать энергию и ток протонного пучка и создать ускоритель с требуемыми параметрами;



- б) выбрать материал мишени и создать ее оптимальную конструкцию для получения нейтронов расщепления;
- в) разработать схему съема тепла в мишенном блоке;
- г) разработать схему и конструкцию подкритического blankets и обеспечить ядерную безопасность;
- д) разработать схему съема тепла в подкритическом blankets;
- е) определить скорости реакций трансмутации долгоживущих нуклидов и скорости их наработки.

Преимущества ADS:

- а) подкритичность активной зоны исключает возможность нежелательного разгона реактора – при выключении ускорителя реакция быстро затухает;
- б) возможность использования тория;
- в) ADS производит мало плутония. Более того, плутоний в ADS может эффективно сжигаться, что положительно сказывается на проблеме нераспространения ядерного оружия;
- г) исключается необходимость в дорогой и энергозатратной процедуре обогащения урана;
- д) возможность производить делящиеся материалы из не делящихся для их дальнейшего использования в подкритических и критических системах;
- е) возможность преобразования некоторых изотопов, присутствующих в ядерных отходах, например, актинидов и продуктов деления, уменьшая их вклад в радиоактивность в геологических репозиториях;
- ж) производится меньше радиоактивных отходов. Отходы ADS через 500 лет должны иметь активность угольной золы.

## **1.2 Проект MYRRHA**

MYRRHA – это первый в мире крупномасштабный проект системы, управляемой ускорителем, с масштабируемыми уровнями мощности для промышленных систем [10].

Реактор MYRRHA создаётся для замены ныне действующего в данном ядерном центре реактора BR2, срок службы которого подходит к концу. Основными задачами нового реактора будет, во-первых, экспериментальная отработка технологий трансмутации долгоживущих изотопов в радиоактивных отходах, во-вторых, производство радиоизотопов для медицинских целей. Также на новом реакторе будут проводиться научные исследования в области ядерной физики и материаловедения. [11]

По схеме реактора Muffin планируется, что протонный пучок из ускорителя будет направляться на свинцово-висмутовую мишень, инициируя ядерную реакцию, получаемые в которой нейтроны, в свою очередь, будут инициировать цепную реакцию в активной зоне реактора. В качестве топлива в реакторе будет использован низкообогащенный уран, в качестве теплоносителя – сплав свинца и висмута, а мощность реактора будет составлять 57 МВт.

Двумя основными компонентами протонного ускорителя являются источник низкоэнергетических протонных пучков (LEBT), разработанный при поддержке Французского Национального Института ядерной физики и физики элементарных частиц (IN2P3); и разработанного в Бельгии квадрупольного усилителя мощности пучка (RFQ). 20 июля 2020 года была завершена состыковка данных компонентов, что фактически означает окончание монтажа ускорителя. Кроме того был проведен ряд испытаний со следующими параметрами: протоны генерировались в виде импульсов длительностью 200 мкс, с частотой 0,5 Гц, энергия протонного пучка при испытаниях составила 1,5 МэВ при токе протонного пучка до 4 мкА.

По итогам первоначальных испытаний был сделан вывод о работоспособности смонтированного ускорителя. В дальнейшем планируется установить дополнительные ускоряющие контуры.

Ускоритель, длиной 400 м должен обеспечивать ток пучка протонов и его энергию равными 4 А и 600 МэВ соответственно. [11]

В качестве теплоносителя планируется использовать свинцово-висмутовую эвтектику. Максимальная мощность реактора – 100 МВт.

Согласно имеющимся планам, строительство самого реактора Murgħa начнётся в 2026 году, а полноценная эксплуатация – в 2034 году.

### **1.3 Проект CLEAR**

Китайский институт технологии безопасности ядерной энергетики INEST ведёт разработку серии реакторов CLEAR с теплоносителями, основанными на свинце [12].

Проекты CLEAR представляют собой целое семейство реакторных проектов различного назначения. В них используются в качестве теплоносителя свинец и свинец-висмут, на будущее рассматривается также свинец-литий.

Китайские специалисты работают по различным направлениям. Они рассматривают проекты как критических реакторов, так и ADS-систем.

В качестве финального результата работ по каждому направлению рассматриваются реакторы-тысячники, однако стартовать планируется с реакторов мощностью не более 10 МВт.

Критическая сборка нулевой мощности CLEAR-0 - первый в серии аппаратов с жидкометаллическим теплоносителем, к сооружению которого в институте INEST уже приступили. Первый этап строительства сборки был завершён в конце 2017 года [13].

Задача сборки CLEAR-0 - выступить в качестве экспериментальной платформы для отработки технологий будущих ТЖМТ-аппаратов и для валидации их проектов.

Топливо – диоксид урана обогащением 19,75 %. Теплоноситель моделируется твёрдым свинцом-висмутом. Активная зона может собираться в двух режимах – критическом и подкритическом. В последнем случае для выхода на критику используется технология ADS.

Результатом первого этапа строительства сборки CLEAR-0 стало создание сборки CLEAR-0A. Она отличается тем, что в ней используется

топливо из природного урана. Сборка может функционировать только за счёт нейтронов, получаемых с помощью нейтронного генератора HINEG (high intensity fusion neutron generator).

В 2018 году на сборке CLEAR-0A прошли эксперименты по измерению выхода нейтронов из ускорителя.

Предположительный срок завершения конструирования финального реактора проекта – 2032 год (CLEAR-III). Предполагается, что данная ADS система будет иметь мощность 1000 МВт, при этом мощность ускорителя составит 15 МВт. Эффективный коэффициент размножения не превысит 0,98. Топливо – уран-ториевое, теплоносителем выступает эвтектика свинец-висмут.

#### **1.4 XT-ADS и EFIT**

В начале 2000-х годов совместными усилиями нескольких европейских стран происходила разработка ADS как экспериментальной демонстрационной установки (XT-ADS), так и промышленного реактора (EFIT). Данные проекты были поддержаны Европейской Комиссией. В качестве базового проекта для XT-ADS был взят проект бельгийского реактора MYRRHA [3].

Однако в скором времени работа над EFIT была заморожена. Дальнейшее проектирование реактора XT-ADS, его зданий и системы доставки пучка осуществляется в рамках проекта CDT2 (при этом название установки было изменено на (Fast Spectrum Transmutation Experimental Facility (FASTEF)), а работа над ускорителем – проектом MAX. Кроме того, масштабные исследования и разработки финансируются федеральным правительством Бельгии и создаются в SCK•CEN для решения ряда вопросов, таких как лицензирование, финансирования и управления. Многие из этих видов деятельности имеют сильную национальную и/или международную структуру сотрудничества [3].

В качестве теплоносителя в FASTEF планируется использовать эвтектику свинец-висмут, тепловая мощность установки ~70 МВт. Плотность

потока быстрых нейтронов ( $E_n > 0,75$  МэВ) –  $10^{15}$  н·(см<sup>2</sup>·с). Ток пучка протонов и его энергия равны 4 А и 600 МэВ соответственно.

### 1.5 Прочие проекты

Деятельность по разработке ADS в Японии в основном осуществляется на предприятии J-PARC, где JAEA и KEK работают совместно. Конкретные установки ADS, однако, находятся на уровне концептуальных проектов промышленного трансмутера на 800 МВт тепловой мощности и связанного с ним сверхпроводящего линейного ускорителя (1,5 ГэВ, 20 мА). План экспериментов в J-PARC включает в себя установку по трансмутации (TEF) для экспериментов по трансмутации на канале 10 Вт, TEF-T для испытаний на мишени Pb-Bi мощностью 200 кВт, а также дальнейшую работу в области сверхпроводящей радиочастотной технологии для международного линейного коллайдера и линейного ускорителя, что может быть актуально для ADS. KEK также ведет активную работу по реализации собственного изготовления и тестирования сверхпроводящих резонаторов [3].

Индия заинтересована в системах ADS, как в реакторе с возможностью работы на ториевом топливе, переход к которому является частью индийской ядерной программы. RCAT сотрудничает с Fermilab в разработке эллиптических сверхпроводящих резонаторов. Разрабатывается полноразмерная инфраструктура для изготовления, обработки и тестирования резонаторов. Кроме того, ведутся исследования и разработки целью которых является создание линейного ускорителя мощностью 1 ГэВ и током 30 мА.

## 2 Модель исследуемой установки

### 2.1 Геометрическая модель

Гибридная энергетическая установка представляет собой комплекс, состоящий из двух составляющих его блоков (рисунок 3 [15]).

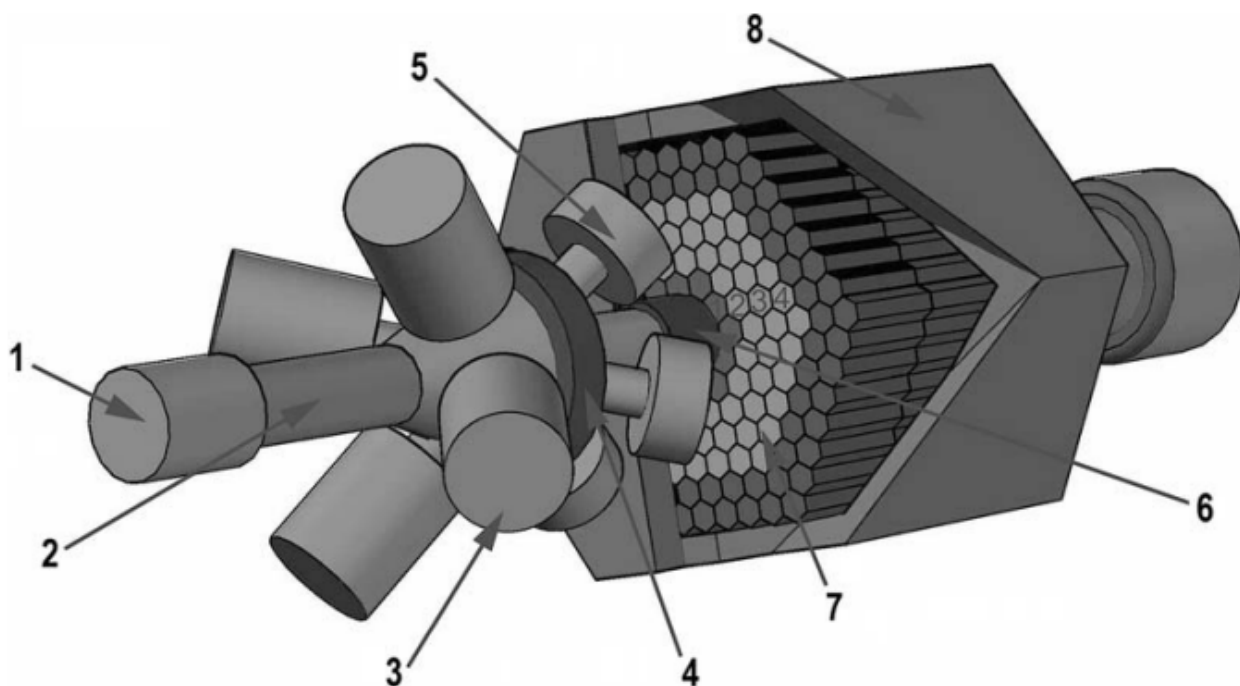


Рисунок 3 – Концептуальный дизайн гибридной реакторной установки «синтезделение»: 1 – приёмник вытекающей плазмы; 2 – камера торможения продольного течения плазмы; 3 – инжекторы нагревных атомарных пучков; 4 – камера нагрева плазмы; 5 – приёмник прошедших пучков; 6 – камера генерации термоядерных нейтронов; 7 – топливная сборка ядерного реактора; 8 – нейтронная защита

В основу первого блока, который является теплопроизводящей частью установки, положена топливная сборка высокотемпературной газоохлаждаемой ториевой реакторной установки малой мощности. При этом размеры blankets и, следовательно, мощность и производительность установки можно варьировать в зависимости от потребности в энергопотреблении в каждом конкретном регионе. Во время работы энергетической установки с подпиткой blankets термоядерными нейтронами из плазмы обеспечиваются условия его

надежного удержания в подкритическом состоянии ( $k_{eff} = 0,95$ ) или в состоянии, близком к критическому ( $k_{eff} = 0,98 - 0,99$ ), что позволяет исключить целый класс наиболее тяжелых аварий, связанных с возникновением неконтролируемого процесса деления на мгновенных нейтронах. В такой установке, выключение плазменного источника нейтронов гарантировано переводит весь ее блок, генерирующий энергию, в глубокоподкритическое состояние ( $k_{eff} < 0,95$ ).

Второй блок, пронзающий приосевую область активной зоны представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру, в которой магнитное поле удерживает высокотемпературную плазму в условиях протекания термоядерных реакций. К этой цилиндрической камере присоединена камера большого диаметра с пониженным магнитным полем, в которую инжектируются пучки высокоэнергетичных нейтральных атомов дейтерия и трития. Магнитное поле на этих двух участках вакуумной камеры, содержащих высокотемпературную плазму, обеспечивает термоизоляцию плазмы от стенок камеры в радиальном направлении. Термоизоляция плазмы вдоль силовых линий магнитного поля обеспечивается магнитными пробками и следующими за ними участками камеры с гофрированным магнитным полем, которые примыкают к обоим концам камеры с высокотемпературной плазмой. Суммарная длина двух участков камеры с высокотемпературной плазмой и примыкающих к ним двух участков с гофрированным магнитным полем составляет около 12 м. Цилиндрическая камера, предназначенная для генерации термоядерных нейтронов в приосевой области blankets гибридного реактора, соответствует по диаметру и длине размерам приосевой области blankets с ядерным топливом.

Расчетная мощность по генерации нейтронов такой шахты составляет  $5,6 \cdot 10^{17}$  н/с, выход нейтронов в blanket при этом составляет  $2,6 \cdot 10^{17}$  н/с.

В основу инженерного решения по данному плазменному генератору DD (DT) термоядерных нейтронов положена разработанная в Институте

ядерной физики им. Г.И. Будкера (Новосибирск) реально действующая газодинамическая многопробочная магнитная ловушка.

Теплопроизводящая часть установки состоит из гексагональных топливных блоков унифицированной конструкции. На рисунке 4 отображены геометрические размеры графитового блока (а) и топливной таблетки (б).

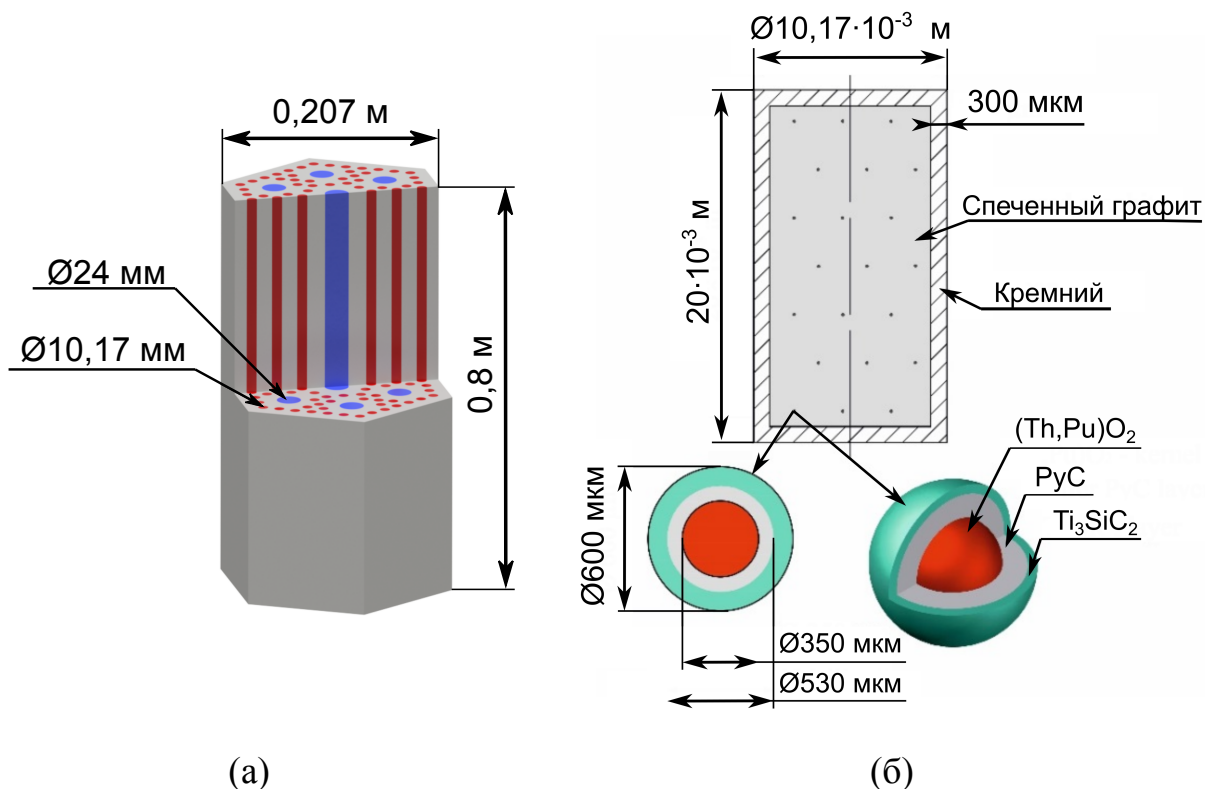


Рисунок 4 – Геометрические размеры графитового блока (а) и топливной таблетки (б)

В таблицах 1-3 указаны основные геометрические параметры активной зоны, графитового блока и топливной таблетки соответственно.

Таблица 1 – Основные геометрические параметры активной зоны

<b>Размер под ключ, м</b>	2,8
<b>Высота, м</b>	2,4
<b>Количество блоков</b>	162
<b>Количество блоков внутреннего отражателя</b>	12
<b>Количество блоков с топливом</b>	72
<b>Количество блоков внешнего отражателя</b>	78



Продолжение таблицы 1

<b>Радиус плазменной шахты, см</b>	30
<b>Эквивалентный радиус внутреннего отражателя, см</b>	41,03
<b>Эквивалентный радиус топливной части, см</b>	89,79
<b>Эквивалентный радиус внешнего отражателя, см</b>	122,46

Таблица 2 – Основные геометрические параметры графитового блока

<b>Диаметр описанной окружности, см</b>	20,7
<b>Высота, см</b>	80
<b>Количество каналов под теплоноситель</b>	7
<b>Количество топливных каналов</b>	78
<b>Диаметр канала под теплоноситель, мм</b>	24
<b>Диаметр топливного канала, мм</b>	10,17

Таблица 3 – Основные геометрические параметры топливной таблетки

<b>Диаметр, мм</b>	10,17
<b>Высота, мм</b>	20
<b>Толщина кремниевой оболочка, мкм</b>	300
<b>Топливо</b>	(Th,Pu)O <sub>2</sub>
<b>Диаметр топливной частицы, мкм</b>	350
<b>Диаметр внутренней PuC оболочка, мкм</b>	530
<b>Диаметр внешней Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> оболочка, мкм</b>	600
<b>Доля дисперсной фазы по объему, %</b>	17
<b>Массовое содержание Pu в Th-Pu смеси, %</b>	50

## 2.2 Расчетная модель

Для исследования распространения «волны» деления детализированная 3D-модель установки (рисунок 4 (а)) упрощена до трехслойного цилиндра с дополнительной центральной областью (рисунок 4 (б)), предназначенной для генератора DT-нейтронов.

Расчетная модель, используемая в симуляциях, представляет собой бесконечную вдоль оси OZ цилиндрически-симметричную систему (рисунок 5),

состоящую из четырех областей, ограниченных радиусами 30, 41,03, 118,34 и 154,7 см. Во внутренней области модельной системы импульсно-периодический источник DT-нейтронов (GDT-FNS), в наружной области графит отражателя плотностью 2,2 г/см<sup>3</sup>. Между этими областями расположена активная зона с гомогенизированным Th<sub>(1-α)</sub>-Pu<sub>α</sub>-топливом, состоящая из 50-ти слоев равного объема, предназначенных для определения радиальных параметров.

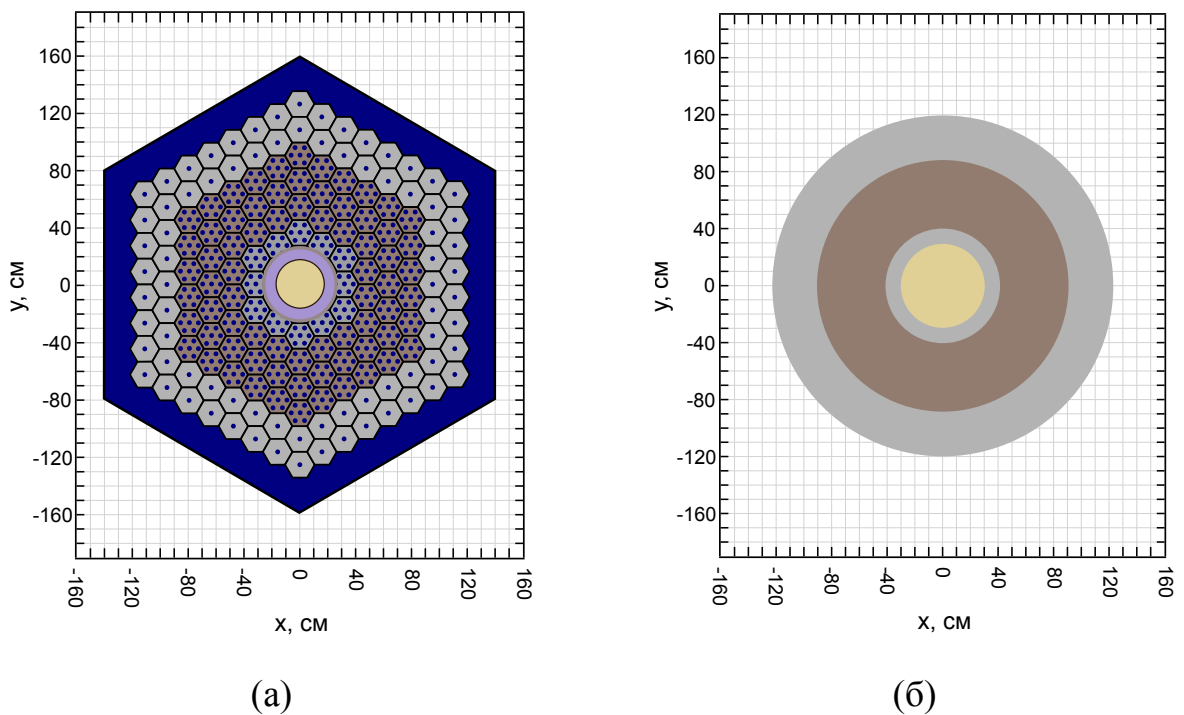


Рисунок 4 – Геометрические размеры детализированной (а) и упрощенной (б) активной зоны

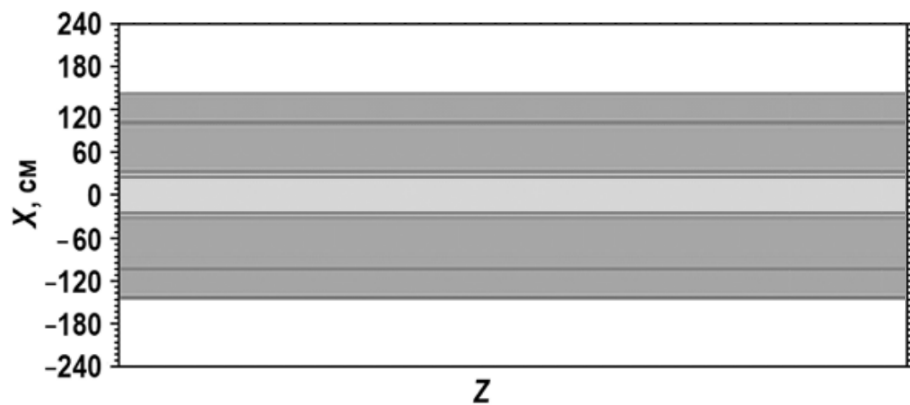


Рисунок 5 – Расчетная 3D-модель: продольное сечение модели в плоскости XZ

Ядерный и массовый состав гомогенизированной активной зоны при  $\alpha = 0,5$  и объемной доле дисперсной фракции  $\omega = 17\%$  приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Состав гомогенизированной активной зоны

Нуклид	Концентрация, 1/(барн·см)	Масса, г/см
<i>Топливная часть</i>		
<sup>232</sup> Th	$9,12954 \cdot 10^{-5}$	704,91
<sup>239</sup> Pu	$8,32798 \cdot 10^{-5}$	662,45
<sup>240</sup> Pu	$4,42977 \cdot 10^{-6}$	35,38
<sup>241</sup> Pu	$8,85955 \cdot 10^{-7}$	7,11
<sup>16</sup> O	$3,59782 \cdot 10^{-4}$	191,49
<sup>12</sup> C	$9,49608 \cdot 10^{-2}$	37918,29
<sup>nat</sup> Si	$1,54768 \cdot 10^{-4}$	144,64
<sup>nat</sup> Ti	$4,64304 \cdot 10^{-4}$	739,73
<sup>nat</sup> He	$2,81828 \cdot 10^{-3}$	375,36
<i>Сумма</i>	$9,89378 \cdot 10^{-2}$	40779,38
<i>Центральный канал</i>		
<sup>nat</sup> He	$2,4770 \cdot 10^{-2}$	465,48
<i>Внутренний отражатель</i>		
<sup>12</sup> C	$9,77567 \cdot 10^{-2}$	4793,08
<sup>nat</sup> He	$2,81827 \cdot 10^{-3}$	46,09
<i>Сумма</i>	$1,00575 \cdot 10^{-1}$	4839,17
<i>Внешний отражатель</i>		
<sup>12</sup> C	$1,10394 \cdot 10^{-1}$	47758,75

Основные параметры дополнительного источника нейтронов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры конфигурации источника

Изотопный состав плазмы	50 % D + 50 % T
Радиус плазмы, см	20
Полная мощность инжекции, МВт	40
Энергия инжекции, кэВ	70

Продолжение таблицы 5

Температура электронов, кэВ	0,77
Температура ионов, кэВ	0,72/0,70
Плотность быстрых ионов в blankets, $10^{13} \text{ см}^{-3}$	5,5/7,5
Плотность теплых ионов в blankets, $10^{13} \text{ см}^{-3}$	1,8/2,3
Захватенная доля нагревных пучков	0,95/0,98
Нейтронный выход в blankets, $\text{н}\cdot\text{с}^{-1}$	$2,6\cdot 10^{17}$
Полный выход нейтронов из плазмы, $\text{н}\cdot\text{с}^{-1}$	$5,6\cdot 10^{17}$

### 3 Результаты моделирования

#### 3.1 Пространственно-временные характеристики

Моделирование пространственно-временного распространения «волны» деления выполнено по программному комплексу PRIZMA [16] с системой констант ENDF/B-VII.1 [17], разработанному в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина».

Результаты расчета пространственно-временных характеристик установки в момент ее пуска с «холодной» активной зоной демонстрирует рисунок 6. Пять поперечных сечений отображают распространение «волны» делений по объему blankets от приосевой области, прилегающей к магнитной ловушке, в радиальном направлении. Из рисунка видно, что влияние источника нейтронов, работающего в импульсно-периодическом режиме, заметно в прилегающих к источнику слоях и исчезает не позже, чем через 0,1 мс на периферии топливных графитовых блоков blankets установки.

Диффузное распределение плотности делений по всему объему blankets после однократного импульса быстрых нейтронов из магнитной ловушки устанавливается в течение промежутка времени порядка 0,1 мс, а время выхода на стационар составляет 0,1 с (100 мс). Результаты моделирования показали, что решение дальнейшей нейтронно-физической задачи (т.е. нахождения  $k_{eff}(t)$  и других требуемых нейтронно-физических функционалов) допустимо путем замены импульсно-периодического источника нейтронов на постоянно действующий квазистационарный источник.

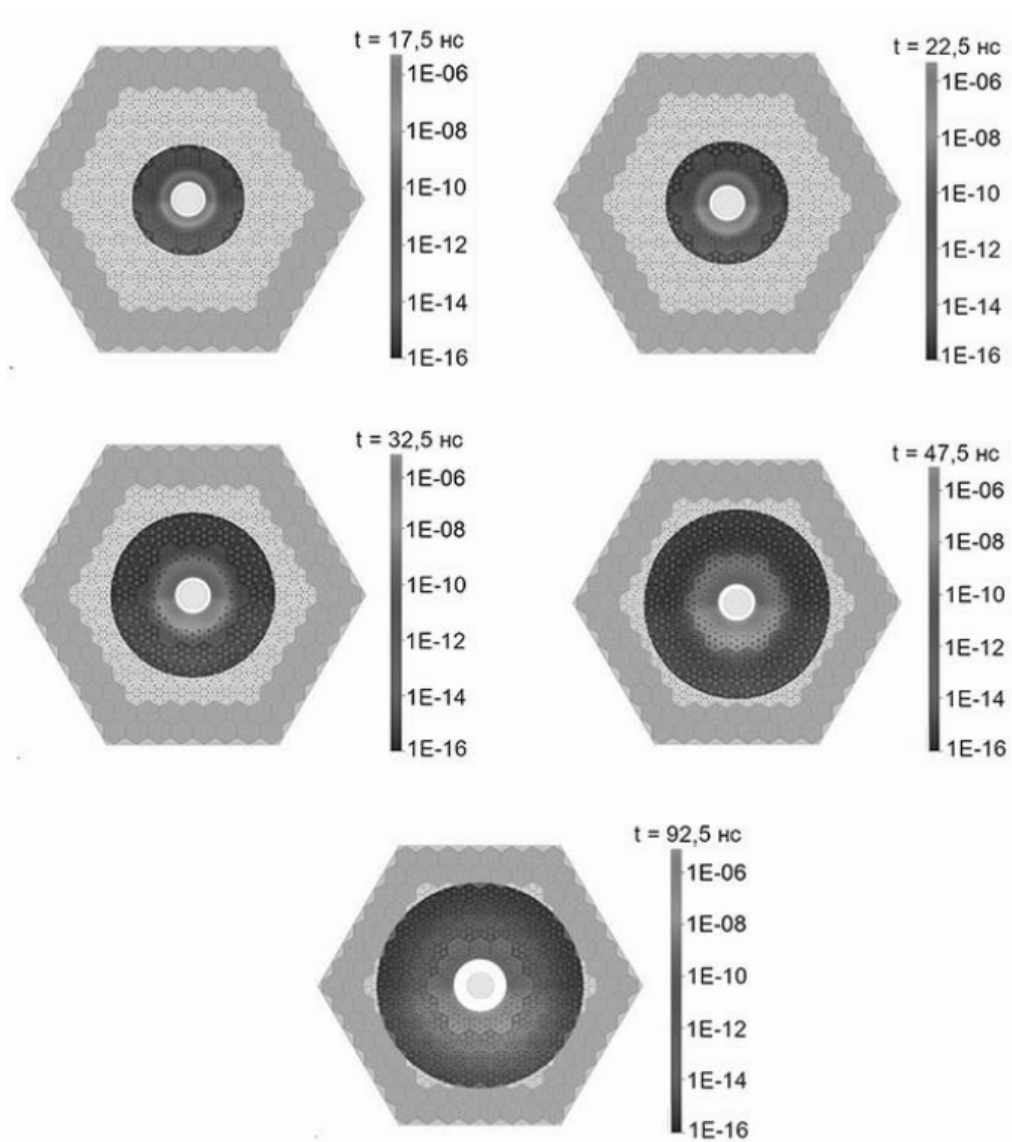


Рисунок 6 – Динамика энерговыделения в гибридной установке «синтез-деление»

Замена импульсно-периодического режима источника (рисунок 7, синяя линия) на постояннодействующий (квазистационарный, красная линия) дает практически такой же результат по времени выхода скорости деления ядер на стационарный уровень. Результаты расчетов показали, что за временной интервал одна секунда полное число делений ядер  $S$  в топливной части бланкета достигает уровня 20-ти событий на единичный нейтрон, поступивший в бланкет из источника нейтронов, и этот уровень остается в дальнейшем неизменным.

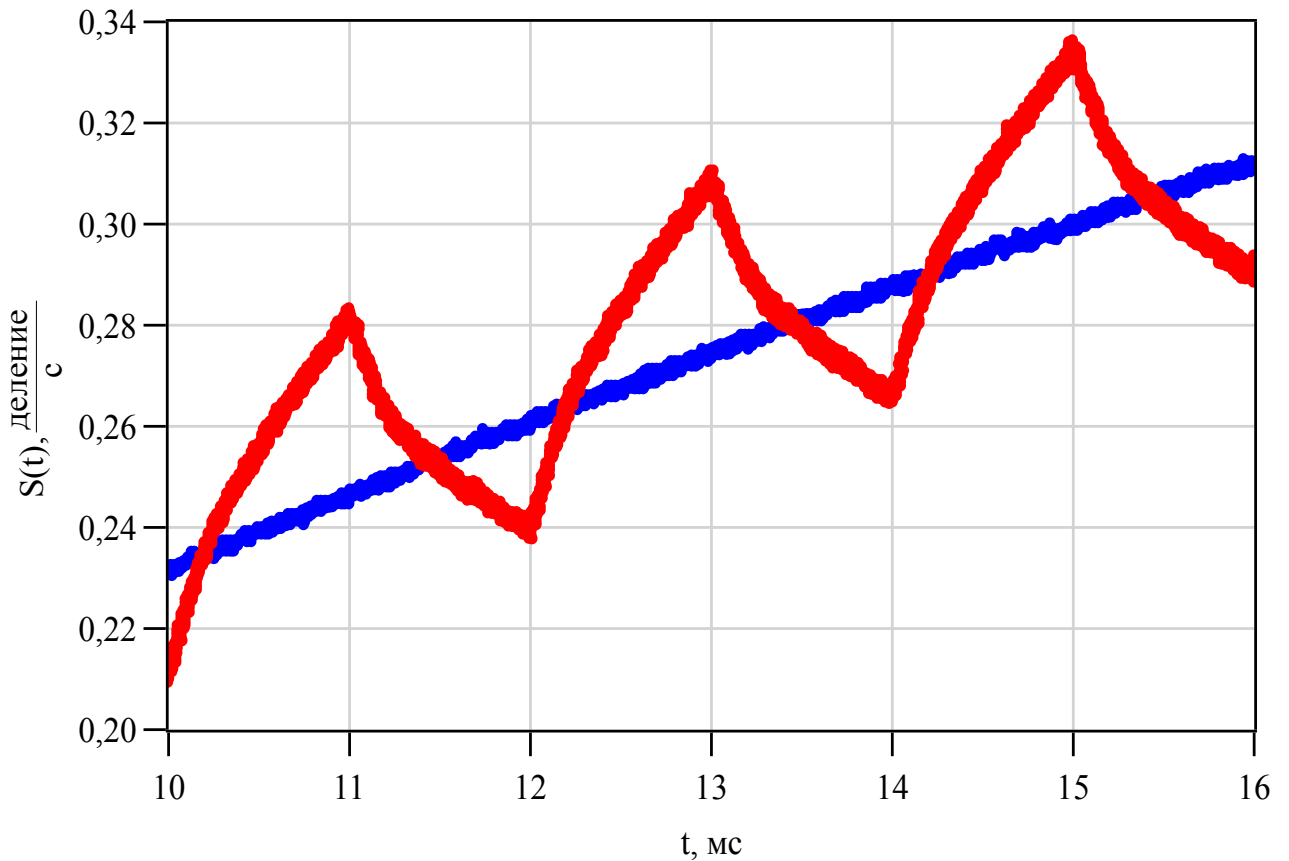


Рисунок 7 – Сопоставление скорости ядерных делений в blankets при работе источника нейтронов в импульсно-периодическом (красная линия) или квазистационарном (синяя линия) режиме

### 3.2 Стационарные нейтронно-физические характеристики

Для определения стационарных нейтронно-физических характеристик ( $k_{eff}(\alpha)$ , где  $\alpha$  – массовое содержание Pu) проведены расчеты условно-критической задачи детализированной активной зоны. Расчет производился при помощи программного обеспечения Serpent 2.1.31 с системой ядерных констант ENDF/B-VII.1. Результаты моделирования приведены для «горячего» состояния реактора, при котором температура топливных элементов принята за 1500 К, а температура остальных материалов – 900 К.

Результаты расчета коэффициента размножения нейтронов в активной зоне, модифицированной под дополнительный DT-источник, приведены на рисунке 8 и в таблице 6.

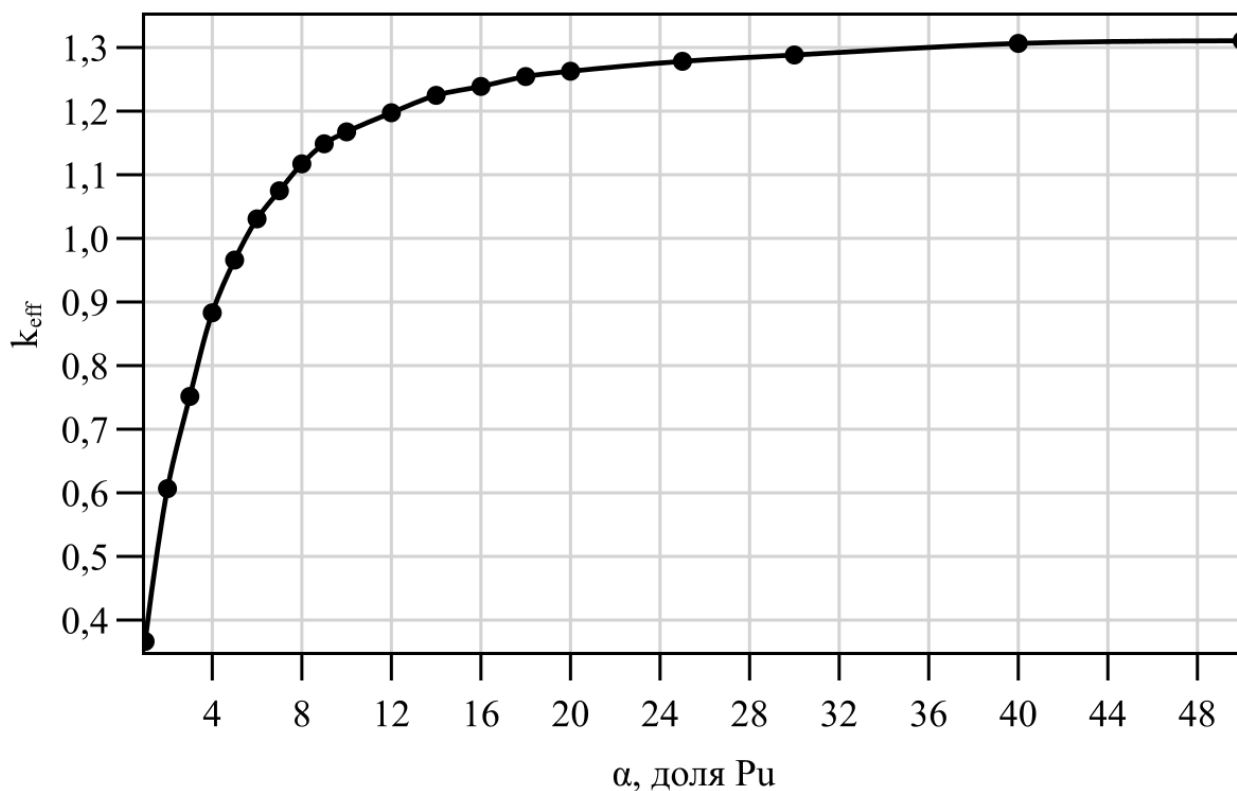


Рисунок 8 – Зависимость эффективного коэффициента размножения установки от массового содержания плутония  $Pu(\alpha)$  в  $Th_{(1-\alpha)}Pu_\alpha$  композиции

Таблица 6 – Стационарные нейтронно-физические характеристики системы

$^{232}Th$ , wt. %	Pu, wt. %	Концентрация нуклида, нуклид/(б·см)				$k_{eff}$
		$^{232}Th$	$^{239}Pu$	$^{240}Pu$	$^{241}Pu$	
95	5	$2,162 \cdot 10^{-2}$	$1,070 \cdot 10^{-3}$	$6,827 \cdot 10^{-5}$	$2,276 \cdot 10^{-5}$	0,9859
50	50	$1,125 \cdot 10^{-2}$	$1,058 \cdot 10^{-2}$	$5,627 \cdot 10^{-4}$	$1,125 \cdot 10^{-4}$	1,3107

Из рисунка и таблицы видно, что подобранный состав обеспечил требуемое для гибридных систем значение  $k_{eff}$  при содержании плутония в  $Th_{(1-\alpha)}Pu_\alpha$  композиции равном 5%. Однако для оптимальной реализации топливной кампании выбрано значение  $\alpha = 50\%$ .

Для рассчитываемой активной зоны было определено распределение нейтронов по радиусу топливной части в соответствии с 172 групповой энергетической сеткой WIMS. Распределение плотности потока нейтронов представлено на рисунке 9. Для удобства восприятия распределение показано



только в трех группах (быстрые: 111,09 кэВ – 19,6403 МэВ, промежуточные: 1,02 эВ – 111,09 кэВ, тепловые:  $1 \cdot 10^{-5}$  эВ – 1,02 эВ).

Повышение потока тепловых нейтронов вблизи внутреннего и внешнего отражателей указывают на необходимость профилирования активной зоны.

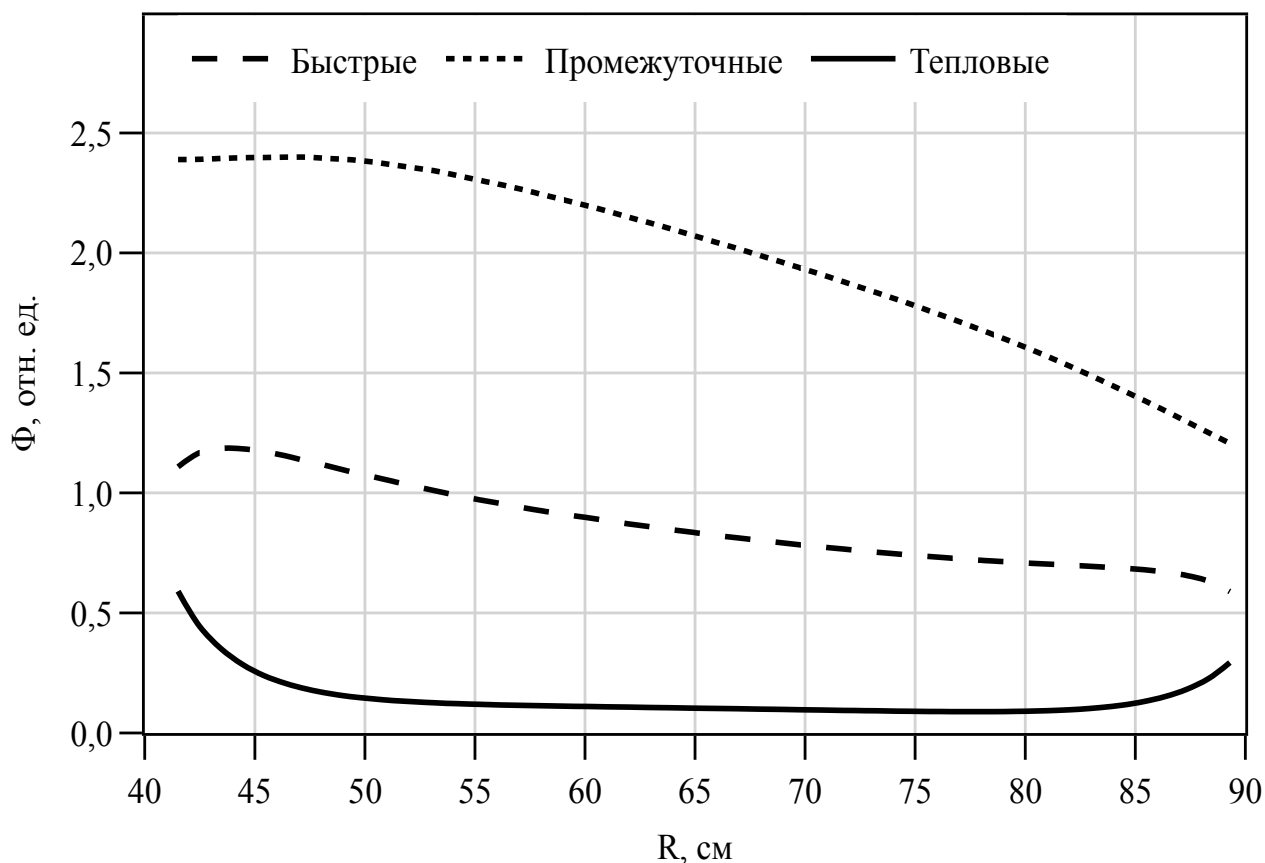


Рисунок 9 – Радиальное распределение тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов

### 3.3 Нейтронно-физическая оптимизация активной зоны

В связи с неравномерным распределением тепловых нейтронов по радиусу активной зоны, что ведет к неравномерностям энерговыделения по топливным ячейкам, появляется необходимость в определении локального энерговыделения в блоках теплопроизводящей установки. Для определения энерговыделений была смоделирована сетка гексагональных детекторов по реакциям стандарта ENDF MT-4 (реакции с выделением тепла), геометрически совпадающих с графитовыми блоками, что позволяет определить энергию, выделяемую в каждой ячейке. Данное

значение было пронормировано на среднее значение энерговыделения по всем ячейкам активной зоны. На рисунке 10 (а) представлены значения относительного энерговыделения по ячейкам для сектора симметрии активной зоны.

Для уменьшения неравномерностей энерговыделения по ячейкам активной зоны было проведено профилирование путем изменения объемной доли топливной фракции в различных тепловыделяющих ячейках. На рисунке 10 (б) приведены значения относительного энерговыделения для оптимизированной активной зоны.

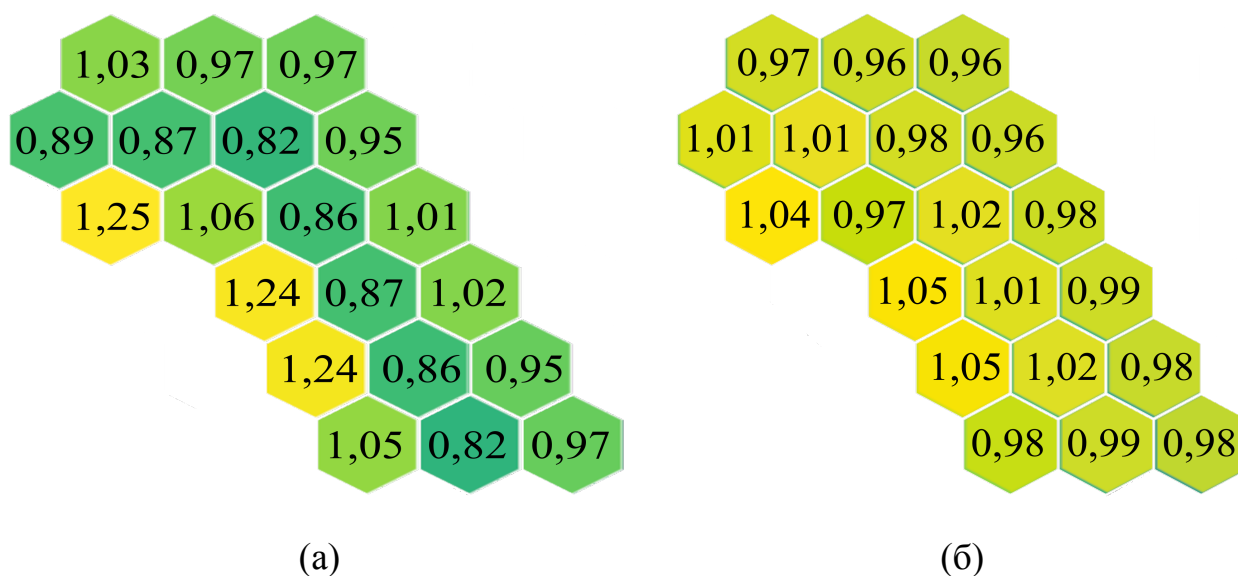


Рисунок 10 – Коэффициенты неравномерности неоптимизированной (а) и оптимизированной (б) активной зоны

Как видно из рисунка 10, использование профилирования позволило снизить коэффициент неравномерности ( $k$ ) с 1,25 до 1,05, где  $k$  определяется по формуле:

$$k = \frac{q_{\max}}{q_{\text{сред}}}, \quad (4)$$

где  $q_{\max}$  – максимальное энерговыделение в ячейке;

$q_{\text{сред}}$  – среднее энерговыделение в ячейке.

Необходимые изменения в объемной содержании дисперсной фазы в составе топлива проиллюстрированы на рисунке 11.

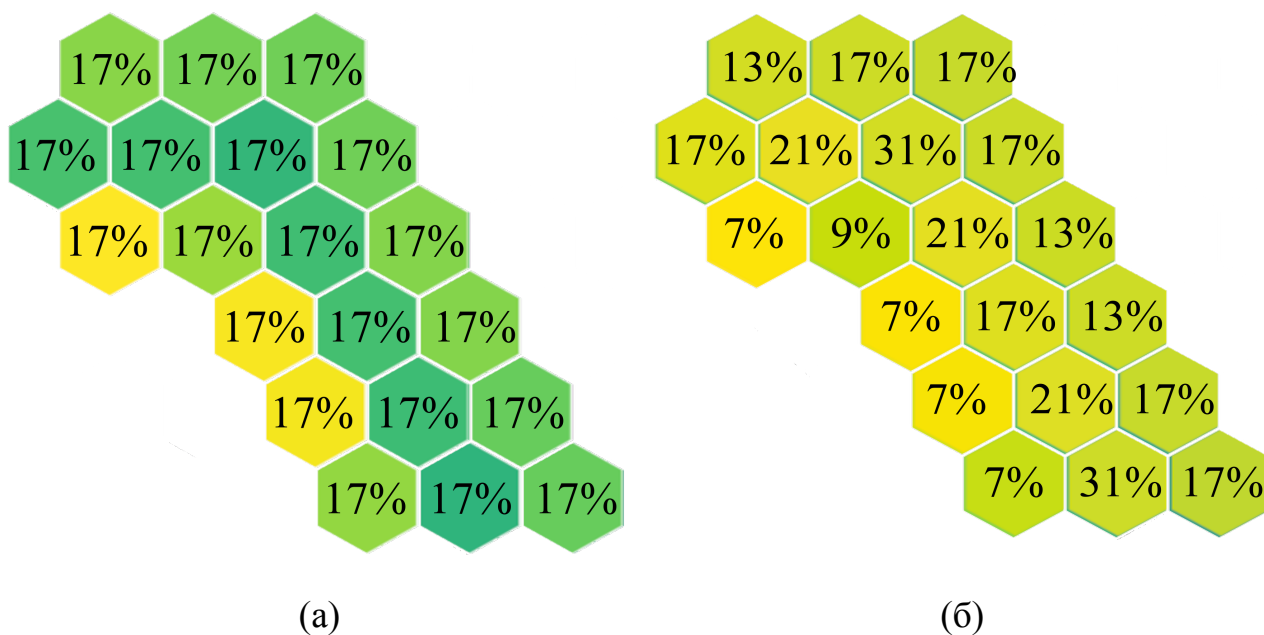


Рисунок 11 – Объемная доля дисперсной фракции в неоптимизированной (а) и оптимизированной (б) активной зоны

Профилирование, выполненное вышеприведенным образом, снижает массу загрузки делящегося материала, что отрицательно влияет на длительность кампании, однако преимущества общего выравнивания поля энерговыделения позволяют пренебрегать данным эффектом. Коэффициент размножения среды при этом повысился до 1,33.

### 3.4 Компенсация избыточной реактивности бланкета установки

Необходимый уровень подкритичности тепловыделяющей установки достигается за счет использования выгорающих поглотителей совместно с постоянными компенсаторами реактивности. Расчет влияния поглотителей на размножающие свойства среды определяется в «холодном» состоянии установки, что является более приемлимым с точки зрения безопасности.

В качестве выгорающего поглотителя используется напыление микронного слоя борида циркония на микротрещинах дисперсного топлива. Использование указанного выгорающего поглотителя позволяет снизить начальный коэффициент размножения нейтронов до 1,124. Таким образом

реактивность установки на данном этапе расчета составила 11,032 %, где реактивность определена по формуле:

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (5)$$

В роли постоянных компенсаторов реактивности выступают стержни из карбида бора, радиусом 1 см, расположенные в центральных каналах третьего и второго топливного ряда, а также внутреннего отражателя. При полном погружении стержней коэффициент размножения нейтронов составляет 0,909, что соответствует требованиям ядерной безопасности при проведении ядерно-опасных работ на остановленной установке. Реактивность при данном коэффициенте размножения составит -10,101 %. Таким образом интегральный вес стержней регулирования, определенный как разность реактивностей перед и после их погружения, составляет 21,021 %. Большой вес стержней позволяет обеспечить глубокую подкритичность в любой момент кампании в условиях выгорания как выгорающего поглотителя, так и самих стержней.

Сектор активной зоны с компенсаторами реактивности (красный цвет) изображен на рисунке 12.

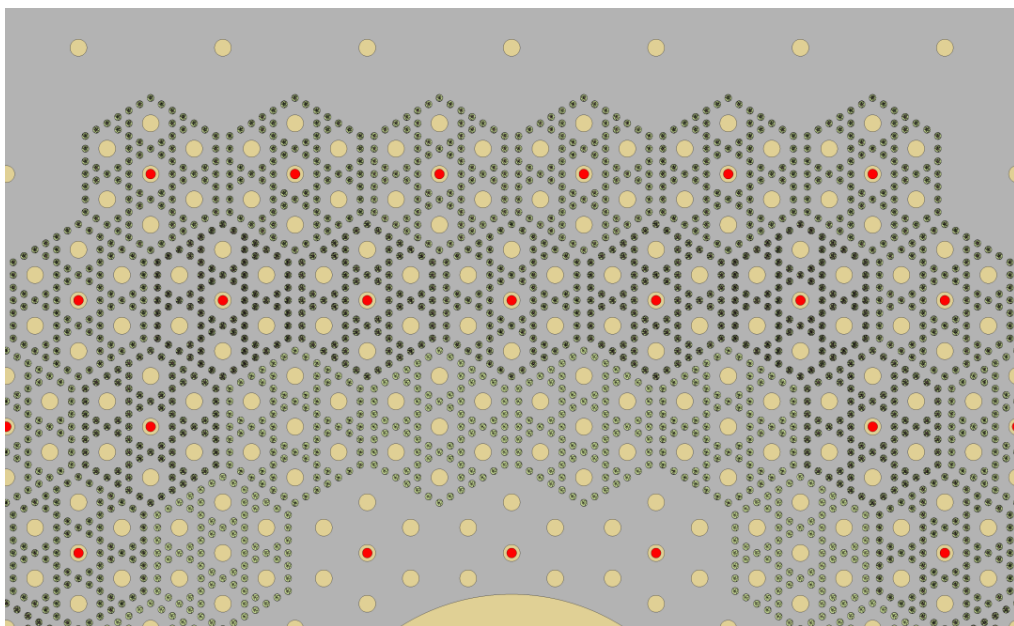


Рисунок 12 – Расположение постоянных компенсаторов реактивности

### 3.5 Температурный эффект реактивности

Перед энергетическим пуском энерговыделяющей установки необходимо произвести разогрев активной зоны, что оказывает сильное влияние на нейтронно-физические параметры, которое необходимо учитывать.

Расчет влияния поглотителей проводился в условиях «холодной» активной зоны (температура материалов – 300 К). Для перехода в «горячее» состояние температура топливной композиции была повышена до 1500 К, а температура теплоносителя и замедлителя до 900 К.

Рассмотрим возникающие температурные и мощностные эффекты реактивности на примере формулы шести сомножителей:

$$k_{eff} = k_{\infty} P_{тепл} P_{быстр} = \mu \varphi \theta \eta P_{тепл} P_{быстр} , \quad (6)$$

где  $k_{\infty}$  – коэффициент размножения нейтронов в конечной среде;  
 $P_{быстр}$  – вероятность избежания утечки надтепловыми нейтронами;  
 $P_{тепл}$  – вероятность избежания утечки тепловыми нейтронами;  
 $\mu$  – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;  
 $\varphi$  – вероятность избежания резонансного захвата;  
 $\theta$  – коэффициент использования тепловых нейтронов;  
 $\eta$  – выход нейтронов на один поглощенный в топливе.

В таблице 7 приведены значения вышеуказанных коэффициентов для «холодного» и «горячего» состояния реактора, а также значения реактивностей соответствующих реактивностей.

Таблица 7 – Параметры «холодного» и «горячего» состояния установки

Коэффициент	«Холодное» состояние	«Горячее» состояние
$\mu$	1,360	1,379
$\varphi$	0,536	0,522
$\theta$	0,768	0,767
$\eta$	1,839	1,836
$P_{быстр}$	0,952	0,952

### Продолжение таблицы 7

$P_{\text{тепл}}$	0,927	0,927
$k_{\infty}$	1,029	1,013
$k_{\text{eff}}$	0,909	0,895
$\rho$ , %	-10,011	-11,732

Как видно из таблицы 7, общая величина температурного и мощностного эффекта реактивности составила -1,721 %. Отрицательный температурный коэффициент реактивности указывает на дополнительную безопасность эксплуатации исследуемой установки.

Основное влияние на изменение реактивности установки оказывают уширения резонансных пиков за счет эффекта Доплера на сечении радиационного захвата нейтронов ядрами  $\text{Th}^{232}$  и аналогичные эффекты на сечении деления  $\text{Pu}^{239}$ , которые, соответственно, уменьшают коэффициент  $\phi$  и увеличивают коэффициент  $\mu$ . Вследствие аналогичности процессов, идущих в различных направлениях по отношению к изменению размножающих свойств среды, реактивность при температурных и мощностных эффектах меняется слабо.

### 3.6 Расчет топливной кампании

Для учета влияния процессов выгорания, отравления и шлакования на нейтронно-физические свойства среды была рассчитана кампания топлива для данной теплопроизводящей установки, в условиях её работы на мощности 60 МВт. В процессе эксплуатации коэффициент размножения нейтронов установки должен лежать в пределах 0,98–0,99. Данное значение коэффициента размножения поддерживалось при помощи движения стержней поглотителей вдоль каналов.

На рисунке 13 представлена зависимость коэффициента размножения нейтронов от выгорания топлива.

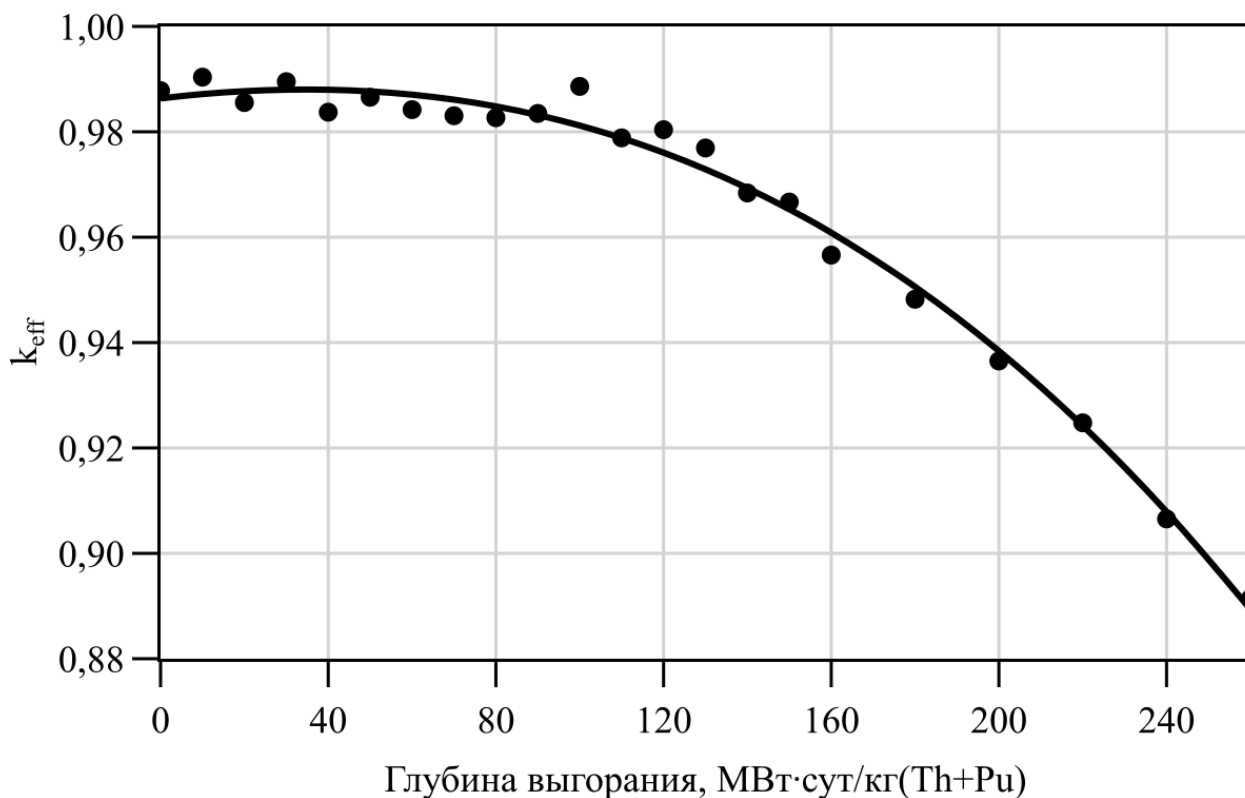


Рисунок 13 – Изменение размножающих свойств среды на протяжении кампании

Для компенсации эффектов, связанных с постепенным выгоранием, отравлением и шлакованием blankets, а также для учета движения стержней поглотителей, работа источника нейтронов должна быть настроена таким образом, чтобы в ходе выгорания топлива нейтронный выход в blanket непрерывно нарастал в соответствии с зависимостью, представленной на рисунке 14.

Принимая, что максимальная мощность данного источника нейтронов равна  $5,6 \cdot 10^{17}$  н/с, можно сделать вывод о том, что максимально возможное выгорание при текущей конфигурации источника составляет 160 МВт·сут/кг(Th+Pu).

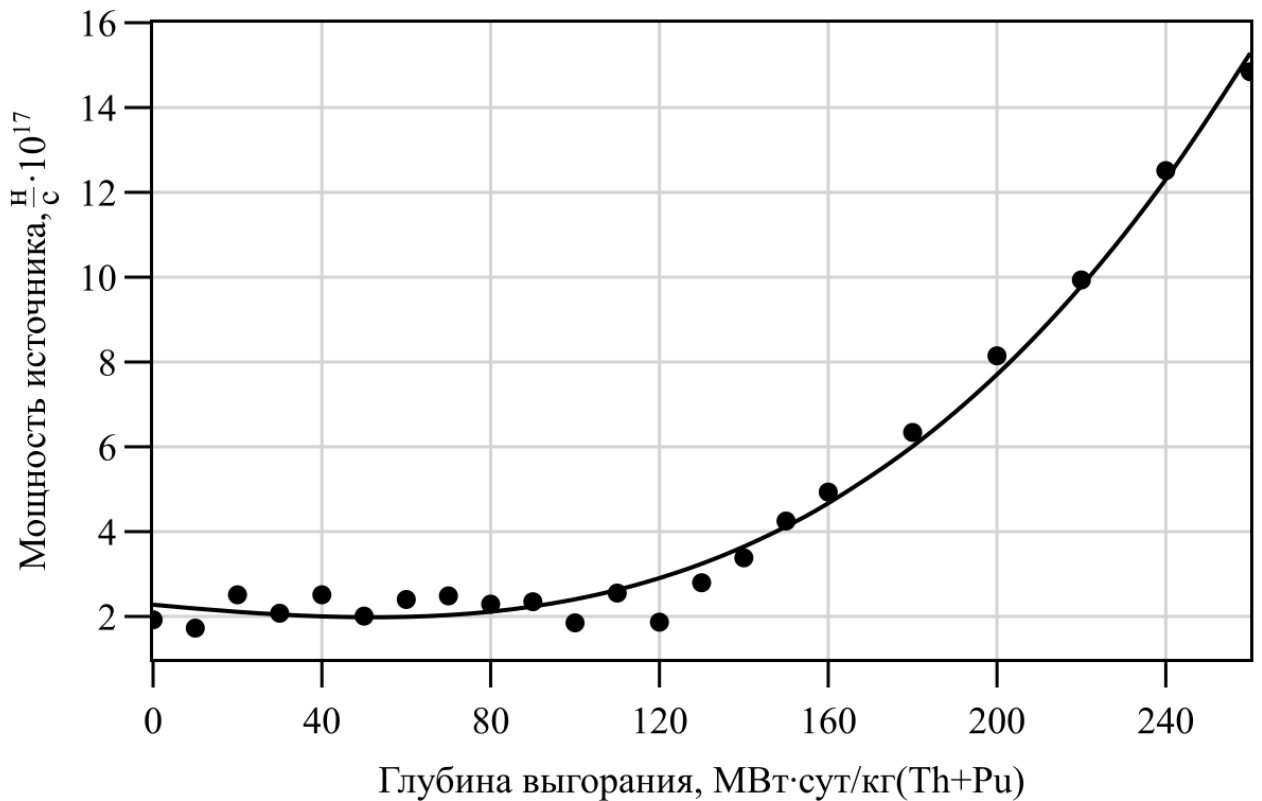


Рисунок 14 – Изменение мощности источника нейтронов на протяжении кампании

На рисунке 15 представлена зависимость тепловой мощности установки от выгорания в условиях работы на максимально возможной мощности источника дополнительных нейтронов при том же режиме движения стержней поглотителей.

При высоком уровне выгорания установку нельзя использовать для получения энергии, однако возможно её использование для исследований свойств топлива.

Изменение коэффициента размножения нейтронов в начале кампании за счет отравления составляет 0,005 (с 0,988 до 0,982). Потери реактивности при этом составляют 0,599 %.



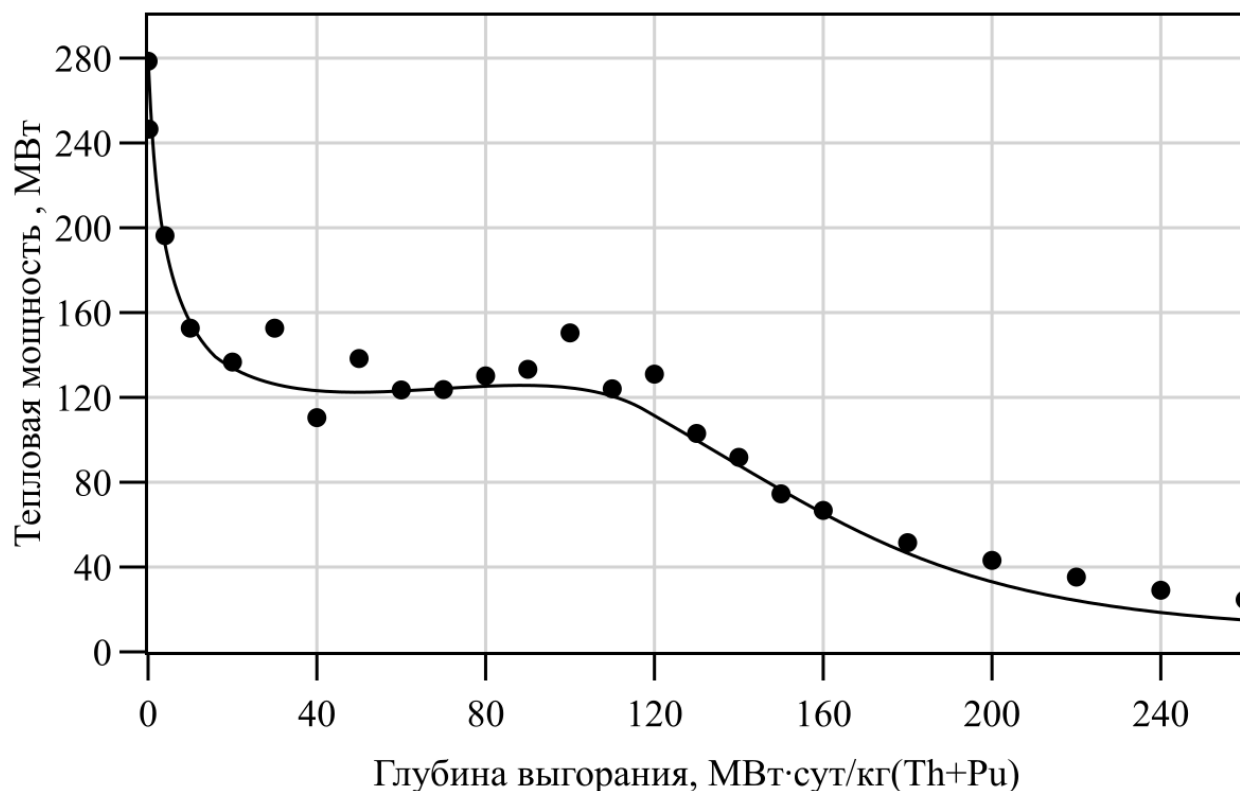


Рисунок 15 – Изменение тепловой мощности установки на протяжении кампании

Массы и отношения масс к начальной загрузке ThPu ряда тяжелых элементов в начале и конце кампании приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Концентрации тяжелых элементов в конце топливной кампании

Нуклид	Начало кампании		Конец кампании	
	Масса, кг	Масса, г/кг(Th-Pu) <sub>0</sub>	Масса, кг	Масса, г/кг(Th-Pu) <sub>0</sub>
<sup>232</sup> Th	133183	500	124365	466,90
<sup>233</sup> U	0	0	4304	16,16
<sup>238</sup> Pu	0	0	198	0,75
<sup>239</sup> Pu	125193	470	33598	126,13
<sup>240</sup> Pu	6659	25	14898	55,93
<sup>241</sup> Pu	1331	5	13154	49,38
<sup>242</sup> Pu	0	0	2623	9,85
<sup>241</sup> Am	0	0	781	2,93

Продолжение таблицы 8

$^{243}\text{Am}$	0	0	533	2,00
$^{242}\text{Cm}$	0	0	144	0,54
$^{244}\text{Cm}$	0	0	149	0,56

Используя данные расчета кампании определен коэффициент воспроизводства топлива, равный 0,431.

На рисунке 16 представлено изменение скорости реакций делений на изотопах  $\text{U}^{233}$ ,  $\text{Pu}^{239}$  и  $\text{Pu}^{241}$  на протяжении топливной кампании.

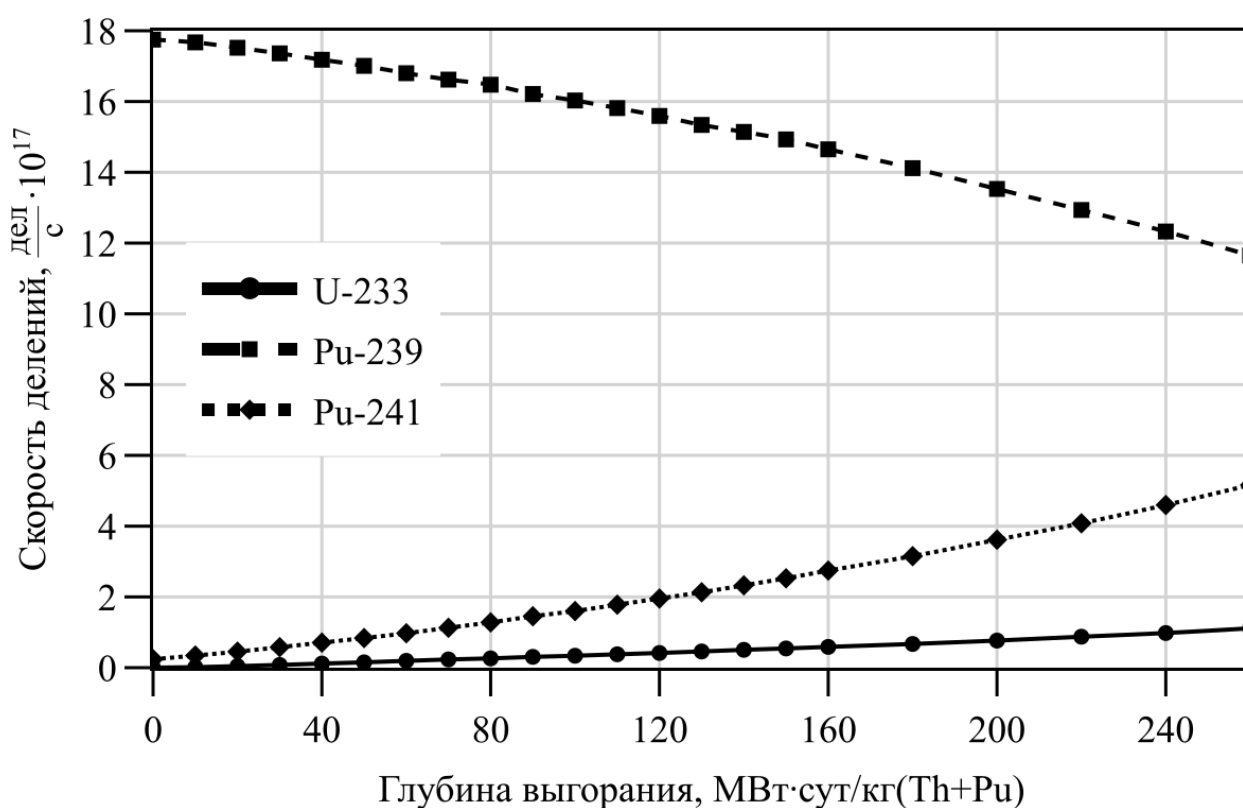


Рисунок 16 – Изменение скорости деления различных нуклидов

Анализируя рисунок 16, можно заключить, что основной вклад в коэффициент воспроизводства вносит наработка  $^{241}\text{Pu}$ , который нарабатывается как из начально загруженного  $^{240}\text{Pu}$ , так и из того же изотопа полученного в процессе радиационного захвата нейтронов  $^{239}\text{Pu}$ .

Общее падение скорости деления на протяжении топливной кампании составляет 1,5 %, что обусловлено возрастающей долей высокоэнергетических нейтронов, влетающих в установку и их последующим замедлением в этой среде.

Среднеквадратичное отклонение всех величин не превышает 0,2 %. Алгоритм определения точности метода Монте-Карло описан в приложении Б.

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

Темой выпускной квалификационной работы является исследование работы генератора ДТ-нейтронов в стационарном и импульсно-периодическом режимах работы. Актуальность работы заключается в возможности организации работы энергетической установки с длительной кампанией топлива, что наиболее важно для северных малонаселенных районов Российской Федерации, транспортировка ядерного топлива в которые является крайне ресурсозатратной.

Цель работы: провести исследование работы генераторов нейтронов в стационарном и импульсно-периодическом режимах работы.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности проекта, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации. Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала внедрения данной методики;
- планирование научно-исследовательской работы;
- расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- определение ресурсной эффективности исследования.

### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Для данного научного исследования целевым рынком будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, научно-исследовательские институты и медицинские учреждения Российской Федерации. Степень потребности различных кампаний в разрабатываемом продукте представлена в таблице 9.

Таблица 9 – Карта сегментирования рынка потребления научного исследования

Степень потребности	Тип учреждения			
	Атомная промышленность	Научные институты	Медицинские учреждения	Экспортный контроль
Сильная	+	-	-	-
Средняя	-	+	-	-
Слабая	-	-	+	+

Исследуя рынок потенциальных потребителей из области атомной промышленности, можно выделить ряд предприятий, которым могут быть интересны результаты исследований:

- АО «Атомпроект»;
- АО «Концерн Росэнергоатом»;
- АО «Наука и инновации».

#### **4.2 Анализ конкурентных технических решений**

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Согласно тематике выпускной квалификационной работы, для анализа представлены три конкурентоспособных варианта методики расчета:

- расчет нейтронно-физических параметров установки с помощью программных кодов Serpent 2.1.31 (вариант 1);
- расчет нейтронно-физических параметров установки с помощью программных кодов WIMS-D5B (вариант 2);
- гомогенизация и последующий многогрупповой расчет нейтронно-физических параметров установки без использования специализированного программного обеспечения (вариант 3).

Оценочная карта анализа представлена в таблице 10. Позиция разработки и конкурентов оценивается по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Расчет конкурентоспособности производился по формуле:

$$K = \sum_{i=1}^n B_i B_i, \quad (7)$$

где  $K$  – конкурентоспособность проекта;

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

$B_i$  – балл показателя.

Таблица 10 – Оценочная карта для сравнения конкурентных исследовательских разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Точность методики	0,18	5	4	2	9,9	0,72	0,36
Функциональная мощность	0,17	5	4	3	0,85	0,68	0,51
Удобство в эксплуатации	0,03	5	4	3	0,15	0,12	0,09
Энергоэкономичность	0,05	3	4	5	0,15	0,2	0,25
Потребность в памяти	0,04	3	4	5	0,12	0,16	0,2
Простота эксплуатации	0,07	5	4	5	0,35	0,28	0,35
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность метода	0,10	5	4	2	0,5	0,4	0,2
Доступность	0,21	4	4	5	0,84	0,84	1,05
Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Финансирование разработанного метода	0,10	5	3	1	0,5	0,3	0,1
Итого	1	95	40	36	13,61	3,95	3,36

Анализируя таблицу 10, можно сделать вывод о предпочтительности выбранной в исследовании методики (вариант 1). Несмотря на большую потребность в вычислительных и энергетических ресурсов, данный метод предоставляет наибольшую гибкость в проведении расчетов и обеспечивает наивысшую точность.

### 4.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ – метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории:

- сильные стороны (Strengths);
- слабые стороны (Weaknesses);
- возможности (Opportunities);
- угрозы (Threats).

Сильные и слабые стороны являются факторами внутренней среды объекта анализа; возможности и угрозы являются факторами внешней среды.

В таблице 11 представлена SWOT-матрица, в которой отражены все слабые и сильные стороны моделирования генератора ДТ-нейтронов выбранным методом, формирующиеся под влиянием внешней и внутренней среды.

Таблица 11 – Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны:</b>	<b>Слабые стороны</b>
	С1. Актуальность темы работы; С2. Низкие затраты на проведение исследования; С3. Высокая точность полученных результатов; С4. Высокая достоверность полученных результатов; С5. Возможность быстрого изменения ряда параметров моделирования.	Сл1. Пропорциональность точности полученных результатов относительно времени моделирования; Сл2. Необходимость наличия лицензии на используемое программное обеспечение ; Сл3. Необходимость в хороших навыках работы с программными кодами.

Продолжение таблицы 11

<p><b>Возможности:</b>                  В1. Актуальность темы для публикаций в научных журналах;                  В2. Использование технологии напыления выгорающего поглотителя, разработанной в ТПУ.</p> <p><b>Угрозы:</b>                  У1. Человеческий фактор (невнимательность, ошибка);                  У2. Наличие конкурирующих программных кодов;                  У3. Отсутствие спроса на разработку.</p>	<p>1. Научная новизна, что в дальнейшем ведет к публикациям в цитируемых научных журналах;                  2. При помощи использования сторонних технологий производится усовершенствование моделируемой установки.</p> <p>1. Моделирование технически невыполнимых режимов работы может отразиться на актуальности данной работы</p>	<p>1. Ограниченность использования методики делает ее актуальной в данной области и дает возможность проводить различные исследования для похожих источников.</p> <p>1. Неверно подобранные параметры моделирования могут привести к недостоверным результатам;                  2. Отсутствие спроса на моделируемую разработку может привести к потере актуальности работы</p>
---	--	--

Для определения взаимосвязей между различными областями матрицы SWOT используется интерактивная матрица проекта, представленная в таблицах 12 и 13. При сильном соответствии внешних и внутренних факторов ставится знак «+», иначе знак «-».

Таблица 12 – Связь сильных сторон с возможностями и угрозами

Внешние факторы	Сильные стороны				
	C1	C2	C3	C4	C5
В1	+	+	+	+	+
В2	+	+	+	+	+
У1	-	-	+	+	+
У2	-	-	-	-	-
У3	+	-	-	-	-



Таблица 13 – Связь слабых сторон с возможностями и угрозами

Внешние факторы	Слабые стороны		
	Сл1	Сл2	Сл3
В1	-	-	+
В2	-	-	+
У1	+	-	+
У2	-	+	-
У3	-	-	-

SWOT-анализ показывает, что преимущества разработанной методики преобладают над её недостатками. Выявлены следующие угрозы в использовании методики:

- неверные параметры моделирования могут повлиять на точность, а соответственно и на достоверность результатов, что может быть решено проведением дополнительных проверок входных файлов и оценки погрешностей;

- возможна потеря актуальности работы в условиях отсутствия спроса.

Благодаря анализу сочетания слабых сторон и возможности выявлено, что ограниченность использования методики делает ее актуальной именно в данной области и дает возможность проводить различные исследования для систем подобного типа.

#### **4.4 Планирование выполнения работ по проекту и формирование бюджета проектной работы**

Для того, чтобы выполнить расчет затрат на выполнение работы, составляется план-график, в котором рассчитывается поэтапная трудоемкость всех работ. Планирование представляет собой перечень этапов и работ при проведении научного исследования с распределением исполнителей каждого этапа. Разработанный список задач и производимых работ представлен в виде таблицы 14.

Таблица 14 – План разработки выполнения этапов проекта

Основные этапы	№	Содержание работ	Исполнитель
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	4	Календарное планирование работ по проекту	Руководитель, инженер
Создание расчетной модели	5	Построение геометрической модели	Инженер
	6	Расчет материального состава	
Моделирование работы установки	7	Моделирование пространственно-временных параметров	Инженер
	8	Стационарный нейтронно-физический расчет	
	9	Нейтронно-физическая оптимизация	
	10	Расчет динамических характеристик	
	11	Моделирование кампании топлива	
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер
Оформление отчета	13	Составление пояснительной записки по проекту	Инженер

Как видно из таблицы 14, моделирование работы генератора нейтронов проводилось в 13 этапов, основную часть которых проводил инженер.

#### 4.5 Расчет трудовых затрат на проектирование

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта. Среднее (ожидаемое) значение трудоемкости  $t_{ож_i}$  определяется по формуле:

$$t_{ож_i} = \frac{3t_{min_i} + 2t_{max_i}}{5}, \quad (8)$$

где  $t_{ож_i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{min_i}$  – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем, чел.-дн.;

$t_{maxi}$  – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем, чел.-дн.

Исходя из расчетов трудоемкости работ, определяется продолжительность каждого этапа работы в рабочих днях по следующей формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i}, \quad (9)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность работы, дн.;

$Ч$  – число исполнителей, одновременно выполняющих задачу, чел.

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

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм, иллюстрирующий календарный план проекта, на котором этапы работ представлены в виде протяженных во времени отрезков, соответствующих датам начала и окончания выполнения данных работ.

Для построения графика Ганта необходимо длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} k_{кал}, \quad (10)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность работы, календарные дни;

$k_{кал}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется как:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых/пр}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,48, \quad (11)$$

где  $T_{кал}$  – общее количество дней в году;

$T_{вых/пр}$  – количество выходных и праздничных дней в году.

Все полученные значения в календарных днях округлены до целого числа и представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						$T_{pi}$ , дни		$T_{ki}$ , дни	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожі}$ , чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	3,55	-
Выбор направления исследований	8		9		8,4		4,2	4,2	6,22	6,22
Подбор и изучение материалов по теме	-	5	-	6	-	5,4	-	5,4	-	7,99
Календарное планирование работ по проекту	4		5		4,4		2,2	2,2	3,26	3,26
Построение геометрической модели	-	5	-	6	-	5,4	-	5,4	-	7,99
Расчет материального состава	-	4	-	5	-	4,4	-	4,4	-	6,51
Моделирование пространственно-временных параметров	-	3	-	5	-	3,8	-	3,8	-	5,62
Стационарный нейтронно-физический расчет	-	4	-	5	-	4,4	-	4,4	-	6,51
Нейтронно-физическая оптимизация	-	5	-	7	-	5,8	-	5,8	-	8,58
Расчет динамических характеристик	-	4	-	5	-	4,4	-	4,4	-	6,51
Моделирование кампании топлива	-	8	-	10	-	8,8	-	8,8	-	13,02
Оценка эффективности полученных результатов	3		5		3,8		1,9	1,9	2,81	2,81
Составление пояснительной записки по проекту	-	7	-	9	-	7,8	-	7,8	-	11,54
Итого									16	87

После расчета временных показателей проектирования, на основе полученной таблицы строится диаграмма Ганта (таблица 16) с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования.

Таблица 16 – Календарный план-график проведения научного исследования

№	Вид работ	T, кал.дн.	Продолжительность выполнения работ																	
			Март		Апр.			Май			Июнь									
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2								
1	Составление и утверждение технического задания	3,55	■																	
2	Выбор направления исследований	6,22		■																
3	Подбор и изучение материалов по теме	7,99			■															
4	Календарное планирование работ по проекту	3,26				■														
5	Построение геометрической модели	7,99				■														
6	Расчет материального состава	6,51					■													
7	Моделирование пространственно-временных параметров	5,62						■												
8	Стационарный нейтронно-физический расчет	6,51							■											
9	Нейтронно-физическая оптимизация	8,58								■										
10	Расчет динамических характеристик	6,51									■									
11	Моделирование кампании топлива	13,02										■								
12	Оценка эффективности полученных результатов	2,81																■		
13	Составление пояснительной записки по проекту	11,54																	■	

## 4.6 Бюджет научного исследования

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

В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат:

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

### 4.6.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат включает в себя стоимость всех материалов, приобретенных при проведении научно-исследовательских работ и осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^n C_i N_{расхи} , \quad (12)$$

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

$n$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов;

$N_{расхи}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т. д.).

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по материальным затратам приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Канцелярский набор	–	1	350	350
Печать	–	300 стр.	1,5	450
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого по статье $C_m$				800

#### 4.6.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных работ

В данной исследовательской работе к специальному оборудованию, необходимому для проведения научных работ, относится ПЭВМ.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{амор} = \frac{C_{об}}{T}, \quad (13)$$

где  $C_{амор}$  – затраты на амортизацию;

$C_{об}$  – стоимость оборудования, руб;

$T$  – срок службы, дни.

Стоимость составных частей ПЭВМ, их срок службы и затраты на амортизацию приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Амортизационные затраты

Наименование	Стоимость, руб	Срок службы, дни	Затраты на амортизацию, руб/день
Процессор	9350	1825	5,12
Блок питания	2450	1825	1,34
Оперативная память	11200	5475	2,05
Материнская плата	6100	1460	4,18

Продолжение таблицы 18

Монитор	9650	1825	5,29
Жесткий диск	4300	1825	2,36
Коммутация	1100	1825	0,6
Компьютерная мышь	300	365	0,82
Клавиатура	700	365	1,92
Итого:			23,68

Оборудование использовалось в течение 107 дней, следовательно амортизационные затраты составят:

$$C_{амор} = 107 \cdot 23,68 = 2533,76 \text{ руб.}$$

#### 4.6.3 Заработная плата исполнителей

Следующим этапом является расчет основной заработной платы работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительной заработной платы:

$$Z_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп} \text{ ,} \quad (14)$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} T_{раб} \text{ ,} \quad (15)$$

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{м} M}{F_{\phi}} \text{ ,} \quad (16)$$



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

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

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

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

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней (таблица 19).

Таблица 19 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	118	118
Потери рабочего времени: отпуск;	60	49
невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	187	198

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_m = Z_b (1 + k_{np} + k_d) k_p, \quad (17)$$

где  $Z_b$  – базовый оклад, руб.;

$k_{np}$  – премиальный коэффициент;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок;

$k_p$  – районный коэффициент.

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

- оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями;

- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д. Премияльный коэффициент равен 0,1;

- иные выплаты – районный коэффициент  $k_p$  по городу Томск равен 1,3.

Руководитель данной научно-исследовательской работы имеет оклад, составляющий 36174 руб. Инженер, как сотрудник лаборатории, имеет ежемесячный оклад, равный 18426 руб. Основные результаты расчета заработной платы исполнителей сведены в таблицу 13.

Таблица 20 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнитель	$Z_б$ , руб	$k_{np}$	$k_о$	$k_p$	$Z_м$ , руб	$Z_{доп}$ , руб	$T_{раб}$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб
Руководитель	36174	0,1	0,188	1,3	61989,94	3712,77	10,7	39727
Инженер	18426	0,1	0,188	1,3	31575,9	1658,53	60,5	100341
Итого:								140068

#### 4.6.4 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются 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.

Общая ставка взносов составляет в 2021 году – 30 %:

– 22 % – на пенсионное страхование;

– 5,1 % – на медицинское страхование;

– 2,9 % – на социальное страхование. При этом сумма взносов к уплате зависит от того, превысил доход установленный лимит или нет.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) , \quad (18)$$

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

для руководителя:

$$C_{внеб} = 0,3 \cdot 39727 = 11918 \text{ руб.};$$

для инженера:

$$C_{внеб} = 0,3 \cdot 100341 = 30102 \text{ руб.}$$

#### 4.6.5 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{накл} = k_{накл} (Z_{осн} + Z_{доп} + C_{внеб} + C_{амор} + C_M) , \quad (19)$$

где  $k_{накл}$  – коэффициент накладных расходов, 16 %.

Таким образом, накладные расходы составляют:

$$C_{накл} = 0,16 \cdot (140068 + 42020 + 2534 + 800) = 29668 \text{ руб.}$$

#### 4.6.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведено в таблице 21.

Таблица 21 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	800
2. Амортизационные затраты	2534
3. Затраты по заработной плате исполнителей работы	140068
4. Отчисления во внебюджетные фонды	42020
5. Накладные расходы	29668
Бюджет затрат исследования	215090

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

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

Настоящая методика не имеет прямых аналогов: возможна лишь частичная замена программного кода на другой. Следовательно, определение эффективности исследования происходит в результате расчета интегрального показателя эффективности, состоящей только из величины ресурсоэффективности.

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

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^n a_i b_i, \quad (20)$$

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

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

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

$n$  – число параметров сравнения.

Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения работы представлена в таблице 22, где аналог 1 представляет Wims моделирование, а аналог 2 моделирование, проведенное вручную.

Таблица 22 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения работы

Критерий	Весовой коэффициент параметра	Текущая работа	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда при использовании метода	0,2	5	5	3
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	2
3. Точность методики	0,2	5	4	2
4. Энергосбережение	0,1	2	3	5
5. Потребность в ресурсах памяти	0,15	3	4	5
6. Функциональная мощность	0,25	5	4	3
Итого:	1	4,4	4,1	3,2

Полученные результаты подтверждают преимущества выбранного варианта методики научного исследования и доказывает его наибольшую эффективность.

#### 4.8 Выводы по разделу

В данной главе проведен анализ конкурентных технических решений научного исследования, в котором выяснено, что выбранная в исследовании методика является наиболее предпочтительной благодаря своей доступности и удобству в использовании. Проведенный SWOT-анализ показал, что преимущества разработанной методики преобладают над её недостатками, а выявленные угрозы являются устранимыми.

Для лучшего планирования проведения работ и реализации труда исполнителей была построена ленточная диаграмма Ганта, которая наглядно иллюстрирует какое время необходимо затратить для осуществления научного исследования. Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер составило 107, а общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель – 22.

Также была определена смета научного исследования, выявлены основные статьи расходов. Бюджет затрат данной научно-исследовательской работы составил 215090 руб.

Оценка эффективности научно-исследовательской работы осуществлялась определением интегрального показателя ресурсоэффективности моделирования генератора. Его значение составляет 4,4 по сравнению с 4,1 и 3,2 для аналогов, что означает, что данная научная разработка является наиболее эффективной.

## **5 Социальная ответственность**

В работе проводится моделирование генератора ДТ-нейтронов в стационарном и импульсно-периодическом режимах работы. Моделирование работы энергетических установок численными методами получило широкое распространение за счет высокой точности вычислений. Моделирование проводилось при помощи персонального компьютера в кабинете 321 10-го корпуса ТПУ.

В данном разделе рассмотрены опасные и вредные факторы, возможные при проведении исследовательских работ, правовые и организационные вопросы, а также мероприятия в чрезвычайных ситуациях.

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.

Опасным производственным фактором, согласно [19], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

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

Вредными факторами при выполнении работ с использованием ПЭВМ являются:

- а) отклонения показателей микроклимата;
- б) повышенный уровень электромагнитного излучения;
- в) повышенный уровень шума;
- г) нервно-психические перегрузки;
- д) недостаточная освещённость рабочей зоны.

## **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Согласно Трудовому Кодексу Российской Федерации [19], каждый работник имеет право на:

- а) рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- б) получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- в) отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев;
- г) обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты;
- д) обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- е) внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы и среднего заработка во время прохождения осмотра;
- ж) гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

## **5.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны исследователя**

Основным объектом в производственных условиях является рабочее место, представляющее собой пространство, в котором может находиться человек при выполнении производственного процесса.



Рабочие места с ПЭВМ при выполнении работы, требующей значительного умственного, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5-2,0 м [20].

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки. При наличии высокого стола, несоответствующего росту исследователя, необходимо пользоваться регулируемой по высоте подставкой для ног.

Рабочий стол и посадочное место должны иметь такую высоту, чтобы уровень глаз пользователя находился чуть выше центра монитора. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Клавиатура должна быть расположена на такой высоте, чтобы пальцы рук располагались на ней свободно, без напряжения, а угол между плечом и предплечьем составлял около 100 °. При работе с мышью рука не должна находиться на весу. Локоть руки или хотя бы запястье должны иметь твердую опору [21].

### **5.3 Производственная безопасность**

При проведении исследований, при разработке или эксплуатации проектируемого решения существует вероятность возникновения вредных и опасных факторов.

Вредные производственные факторы – факторы, приводящие к заболеванию, в том числе усугубляющие уже имеющиеся заболевания.

Опасные производственные факторы – факторы, приводящие к травме, в том числе смертельной [22].

В таблице 23 представлены возможные вредные факторы, воздействующие на исследователя, работа которого связана с разработкой расчетной модели на компьютере.

В данном подразделе также предложены решения по снижению влияния каждого фактора на работающего и мероприятия, обеспечивающие безопасность технологического процесса и эксплуатации оборудования.

Таблица 23 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Нормативные документы
Повышенный уровень электромагнитного излучения	СанПиН 1.2.3685–21 [20]
Недостаточная освещенность рабочей зоны	СанПиН 1.2.3685–21 [20]
Превышение уровня шума	СН 2.2.4/2.1.8.562–96 [24]
Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548–96 [25]
Психофизиологические факторы	ТОИ Р-45-084-01 [26]
Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ [27]

### 5.3.1 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение представляет существенную опасность для человека по сравнению с другими вредными факторами. В рассматриваемом случае источником электромагнитного излучения является компьютерная техника. Длительное воздействие электромагнитных излучений может вызывать повышенную утомляемость, появление сердечных болей, нарушение функций центральной нервной системы. Следует отметить, что нагревание процессора при работе вызывает выработку некоторых вредных соединений, которые в свою очередь приводят к деионизации окружающего пространства.

Нормы электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ приведены в таблице 24, в соответствии с [20].

Таблица 24 – Допустимые уровни ЭМП, создаваемые ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров	Диапазон частот	ВДУ ЭМП
Напряжённость электрического поля	5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Существует ряд рекомендаций, следуя которым можно уменьшить негативное воздействие от компьютерной техники:

а) если несколько компьютеров или ноутбуков постоянно находятся в одном помещении, то следует располагать их по периметру комнаты, оставляя центр свободным, поскольку боковые стороны и задняя поверхность монитора генерируют гораздо больше вредного излучения;

б) выключать компьютер после окончания работы: чем дольше он работает, тем больше излучения генерирует, и выделяет существенное количество вредных веществ в окружающую среду;

в) использование специальной защитной пленки;

г) систематическое вытирание пыли, влажная уборка и применение ионизаторов.

### 5.3.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Источниками света могут быть как естественные (солнце), так и искусственные объекты (электрические лампочки). При длительной работе в условиях недостаточной освещенности и при нарушении других параметров световой среды возникает вероятность снижения зрительного восприятия, развития близорукости, появления головной боли.

Основной поток естественного света должен быть слева. Солнечные лучи и блики не должны попадать в поле зрения оператора и на мониторы.

Экран монитора должен располагаться в зоне защитного узла светильника, и его проекция должна быть вне экрана монитора.

Согласно [20], освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Количество используемых искусственных источников света рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot K}{F \cdot \Phi \cdot m}, \quad (21)$$

где  $E$  – нормированная освещённость, 300 лк;

$S$  – площадь помещения, 40 м<sup>2</sup>;

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения, 1,15;

$K$  – коэффициент запаса, 1,1;

$F$  – световой поток одной лампы, 1050 лм;

$\Phi$  – коэффициент использования, 0,52;

$m$  – число ламп в светильнике, 4.

Таким образом:

$$n = \frac{300 \cdot 40 \cdot 1,15 \cdot 1,1}{1050 \cdot 0,52 \cdot 4} = 6,95 \text{ шт.}$$

Во избежание недостаточного освещения рабочего пространства расчетное количество светильников округляется до целого в большую сторону. Таким образом, необходимое количество светильников в кабинете 321 10-го корпуса составляет семь штук.

### 5.3.3 Превышение уровня шума

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Длительное воздействие шума влечет тугоухость работника вплоть до его полной глухоты.

В таблице 25 представлены допустимые уровни шума в рабочей зоне использования ПЭВМ, указанные в СанПиН 1.2.3685–21.

Таблица 25 – Значения ПДУ шума

Уровни звукового давления (Дб) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Уровень шума на рабочих местах во время работы на с ПЭВМ не должен превышать 55 дБ [Ошибка: источник перекрёстной ссылки не найден]. Для снижения уровня шума потолок или стены должны облицовываться звукопоглощающим материалом с максимальным коэффициентом звукопоглощения в области частот от 63 до 8000 Гц [Ошибка: источник перекрёстной ссылки не найден]. Дополнительным звукопоглощением служат занавеси на окнах, выполненные из плотной тяжелой ткани.

#### 5.3.4 Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат производственных помещений – это условия внутренней среды помещений (сочетания температуры, влажности, скорости движения воздуха), влияющие на тепловое состояние человека и определяющие работоспособность, здоровье и производительность труда. Для обеспечения безопасного производства работ необходимо соблюдать требования микроклимата рабочей зоны, определяемые в [25]. В таблице 26 представлены оптимальные меры микроклимата для работ, производимых сидя и сопровождающимся незначительным физическим напряжением.

В компьютерных помещениях должна проводиться ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы. Для поддержания нормальных параметров микроклимата в рабочей зоне применяют устройства систем вентиляции, кондиционирования воздуха и отопления [28].

Таблица 26 – Оптимальные нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С не более	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Легкая 1а	22-24	40-60	0,1
Теплый	Легкая 1а	23-25	40-60	0,1

Вентиляция позволяет создать нормальные санитарно-гигиенические условия в помещениях. Процесс вентиляции позволяет из производственного помещения непрерывно удалять загрязненный воздух и одновременно подавать свежий воздух в таком количестве, при котором концентрация вредных веществ в воздухе будет ниже предельно допустимой, а температура, влажность и скорость движения воздуха соответствуют санитарным нормам. Согласно [29] в данной аудитории необходима кратность воздухообмена 20 м<sup>3</sup>/ч на одного человека. Аудитория 321 рассчитана на 12 рабочих мест.

Таким образом необходимая производительность вентиляции составит:

$$L = 20 \cdot 12 = 240 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для качественного воздухообмена в рассматриваемой аудитории подходит вентилятор типа Vents ВЕНТС 150, имеющий производительность 292 м<sup>3</sup>/ч, мощностью 24 Вт [30].

### 5.3.5 Психофизиологические факторы

Нервно-психические перегрузки подразделяют на:

- а) умственное перенапряжение, в том числе вызванное информационной нагрузкой;
- б) перенапряжение анализаторов, в том числе вызванное информационной нагрузкой;
- в) монотонность труда - эмоциональные перегрузки.

Перенапряжение зрительных анализаторов может привести к утомлению и нарушению сократительной функции глазных мышц. Нервно-эмоциональное напряжение может быть вызвано ответственностью за выполняемую работу, высокими требованиями к качеству выполняемых работ, сложностью работы, особенно в условиях дефицита времени. Нервно-эмоциональное напряжение может нарушить функциональное состояние сердечнососудистой и центральной нервной системы [31].

Для снижения воздействия вредных факторов, устанавливаются рамки длительности перерывов. В таблице 27 приведено суммарное время отдыха для каждой категории работ [26].

Таблица 27 – Суммарное время перерывов в зависимости от категории работы и нагрузки

Категория работы	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ			Суммарное время регламентированных перерывов при 8-часовой смене, мин
	группа А, количество знаков	группа Б, количество знаков	группа В, часов	
I	до 20 000	до 15 000	до 2	50
II	до 40 000	до 30 000	до 4	70
III	до 60 000	до 40 000	до 6	90

В данном случае уровень нагрузки относится к группе В, категория работы III. Согласно таблице, требуется установить перерывы, сумма которых за смену составит не менее 90 минут т.е. перерывы по 15 минут каждый трудовой час [26].

### 5.3.6 Поражение электрическим током

Электрический ток, протекая через тело человека, производит термическое (ожоги), электролитическое (разложение жидкостей в организме), биологическое (судороги), механическое и световое воздействие (раздражение глаз).

Согласно [27], в зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Рабочий кабинет относится к 1-й категории по электробезопасности, так как на рабочем месте отсутствуют электроустановки с напряжением свыше 1000 В.

Поражение электрическим током в случае 1 класса помещения (без повышенной опасности) может произойти в следующих случаях:

а) при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;

б) при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);

в) при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

г) при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Значения напряжения прикосновения и силы тока, протекающего через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки, согласно [27], не должны превышать значений, приведенных в таблице 28.

Таблица 28 – Предельно допустимые значения напряжения соприкосновения и силы тока

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значение	
	$U_{пр}$ , В	$I_h$ , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0



При неисправности каких-либо блоков компьютера корпус может оказаться под током, что может привести к электрическим травмам или электрическим ударам. Для устранения этого необходимо обеспечить подсоединение металлических корпусов оборудования к заземляющей жиле.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год. Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования [32].

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- а) при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- б) при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- в) при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- г) при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- а) отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- б) вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- в) заземление корпусов всех установок через нулевой провод;

г) покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

д) недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, токоведущих частей) [27].

### **5.3.7 Пожарная и взрывная безопасность**

Согласно [33], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, 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 и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

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

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т.д., необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

а) исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

б) применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;

в) правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

г) правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

д) обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

е) издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

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

з) правильное размещение оборудования;

и) своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

а) сообщить руководству (дежурному);

б) позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;

в) принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией [33].

## 5.4 Чрезвычайные ситуации

В таблице 29 указаны основные чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть на рабочем месте, а также меры по их предотвращению и действия, предписываемые к выполнению в случае возникновения данных ситуаций.

Таблица 29 – Чрезвычайные ситуации, меры предотвращения и действия в случае возникновения [34,35]

№	Чрезвычайные ситуации	Меры предотвращения ЧС	Действия в случае возникновения ЧС
1	Пожар	<ul style="list-style-type: none"> <li>- проверять состояние электротехнических устройств, в случае обнаружения неполадок не приступать к самостоятельному устранению;</li> <li>- соблюдать правила пожарной безопасности согласно требованиям нормативной документации;</li> <li>- проводить обучение и инструктаж работников, отрабатывать навыки пожаротушения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- отключить электрооборудование;</li> <li>- использовать порошковые и углекислотные огнетушители;</li> <li>- в случае угрозы жизни эвакуироваться;</li> <li>- позвонить 01, 101, 112</li> </ul>
2	Поражение электрическим током	<ul style="list-style-type: none"> <li>- проводить обучение и инструктаж работников, отрабатывать навыки пожаротушения</li> </ul> <p>Запрещается:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- работа влажными и грязными руками;</li> <li>- трогать разъёмы соединительных кабелей;</li> <li>- самостоятельно устранять неисправности аппаратуры</li> <li>- прикасаться к питающим проводам и устройствам заземления</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- устранить воздействие тока на пострадавшего;</li> <li>- уложить пострадавшего на твёрдую поверхность;</li> <li>- проверить наличие дыхания и пульса;</li> <li>- вызов 03 во всех случаях обязателен</li> </ul>

## Продолжение таблицы 29

3	Падение с высоты	<p>- убедитесь, что компьютерные провода не находятся на пути передвижения, в случае нарушения сообщите руководителю; - не используйте вместо лестницы стул, стол и т.д.; - не допускайте размещения оборудования и документации на полках и шкафах, доступ к которым невозможен без стремянки;</p> <p>- передвигаясь по лестницам, всегда держитесь за поручень и смотрите под ноги;</p> <p>- не держите руки в карманах, т.к. в случае падения инстинктивные движения помогут удержаться на ногах;</p> <p>- никогда не переносите предметы, держа их перед собой, закрывая обзор;</p> <p>-очищайте обувь от грязи, льда и прочих загрязнений перед входом в здание</p>	<p>- провести осмотр тела и головы пострадавшего на наличие открытых ран и ссадин;</p> <p>- попросить произвести движения кончиками пальцев, что позволит исключить повреждения позвоночника;</p> <p>- движение руками и ногами позволит исключить наличие переломов;</p> <p>- опросить пострадавшего о нарушениях общего самочувствия: головокружении, сонливости, тошноте – эти признаки свидетельствуют о сотрясении мозга;</p> <p>- в случае отсутствия серьёзных травм на место ушиба кладут холодный компресс и сопровождают пострадавшего до дома;</p> <p>- при наличии серьёзных травм необходимо позвонить в 03(103) или 112 и сообщить о случившемся. Ни в коем случае не пытаться поднять пострадавшего</p>
---	------------------	--	--

### 5.5 Выводы по разделу

В ходе выполнения раздела рассмотрены следующие вредные и опасные факторы:

- а) отклонения показателей микроклимата [20, 22];
- б) повышенный уровень электромагнитного излучения [20];
- в) повышенный уровень шума [20];
- г) нервно-психические перегрузки [26];
- д) недостаточная освещённость рабочей зоны [20,23].

Установлено, что выполняемая работа не сопряжена с высоким риском травматизма. Освещенность на рабочем месте и уровни шума находятся в допустимых пределах нормы. Микроклиматические условия соблюдаются за счет использования систем отопления и кондиционирования. Вероятность поражения электрическим током сведена к минимуму. Помещение оборудовано согласно требованиям электробезопасности и пожарной безопасности. Исходя из сказанного следует, что рабочее место соответствует нормам по защищенности от вредных и опасных факторов.

Определено, что аудитория 321 10 корпуса ТПУ относится:

- а) к категории В по пожаро- и взрывобезопасности [36];
- б) к 1 классу по электробезопасности [27].

В заключительной части раздела рассмотрены меры по предотвращению наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций на рабочем месте, а также действия в случае их возникновения.

## **Заключение**

В процессе выполнения работы создана расчетная модель исследуемой установки и проведены исследования ее стационарных и пространственно-временных нейтронно-физических характеристик, а также динамики энерговыделения.

Результаты пространственно-временного моделирования показали возможность осуществления моделирования системы с заменой импульсно-периодического режима работы установки на стационарный, что позволяет существенно уменьшить объём компьютерных вычислений в расчётах нейтронно-физических характеристик.

Проведена нейтронно-физическая оптимизация blankets установки путем изменения объемной доли топливной фракции в топливных ячейках, что позволило уменьшить коэффициент неравномерности энерговыделения по сечению blankets с 1,25 до 1,05.

Проведено моделирование движения компенсирующих стержней, благодаря чему коэффициент размножения нейтронов поддерживался на уровне 0,98-0,99 при глубине выгорания топлива до 120 МВт·сут/кг(Th+Pu).

Результаты моделирования топливной кампании показали, что при использовании текущей конфигурации источника дополнительных нейтронов максимально возможная глубина выгорания топлива составит 160 МВт·сут/кг(Th+Pu). Для увеличения времени работы установки на одной топливной загрузке необходимо повысить мощность источника нейтронов.

## Список публикаций студента

1. Shamanin I.V., Bedenko S.V., Shmakov V.M., Modestov D.G., Knyshev V.V. Lutsik I.O., Polozkov S.D. Power density dynamics in a nuclear reactor with an extended in-core pulse-periodic neutron source based on a magnetic trap // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika. – 2020 – Vol. 2020 - № 2 - p. 17–26. <https://nuclear-power-engineering.ru/en/article/2020/02/02/>

2. Shamanin I.V., Shmakov V.M., Modestov D.G., Bedenko S.V., Polozkov, S.D., Prihodko V.V., Arzhannikov, A.V. Neutron data field in a fission reactor core with fusion neutron source at pulse-periodic operation // 47th Zvenigorod International Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020 – Vol. 1647 - № 1 - p. 012007. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1647/1/012007>

3. Shamanin I.V., Bedenko S.V., Lutsik I.O., Polozkov, S.D., Arzhannikov, A.V. Particularities of spatial kinetics of hybrid thorium reactor installation containing the long neutron source based on magnetic trap // 14th International Forum on Strategic Technology. – 2021 – Vol. 1019 - № 1 - p. 012037.

4. Шаманин И. В., Аржанников А. В., Приходько В. В., Шмаков В. М., Модестов Д. Г., Луцик И. О., Полозков С. Д., Беденко С. В. Гибридная «синтез-деление» реакторная установка на ториевом топливе с источником дополнительных термоядерных нейтронов // Сибирский физический журнал. - 2021. - Вып. 16 - С. 21–43. [http://phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2021/01/SJP\\_21T16V1\\_p21\\_p43.pdf](http://phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2021/01/SJP_21T16V1_p21_p43.pdf)

5. Масенко С.А., Полозков С.Д., Беденко С.В. Миграция актинидов в геосистемах // X школа-конференция молодых атомщиков Сибири, Томск, 09.11.2020–13.11.2020. - Томск, 2020 – С. 59 <http://школа-атомщиков.рф/upload/medialibrary/07c/07c2b85ab781bd4a9a636dde1fbf8da0.pdf>

6. Шаманин И.В., Луцик И.О., Беденко С.В., Полозков С.Д. Поддержание гибридной установки с торий-содержащим топливом в



околокритическом состоянии за счёт управляемого источника пермоядерных нейтронов // X школа-конференция молодых атомщиков сибери, томск, 09.11.2020–13.11.2020 - Томск, 2020 – С. 59 <http://школа-атомщиков.рф/upload/medialibrary/07c/07c2b85ab781bd4a9a636dde1fbf8da0.pdf>

7. Полозков С.Д., Шаманин И.В., Беденко С.В. Поддержание гибридной установки с торий-содержащим топливом в околокритическом состоянии за счёт управляемого источника пермоядерных нейтронов // Современные технологии, экономика и образование, Томск, 02.09.2020–04.09.2020 - томск, 2020 – с. 59 <https://portal.tpu.ru/science/konf/methodconf/Сборник%20материалов%20конференции>

## Список литературы

1. Субкритический реактор, управляемый ускорителем : сайт. – Москва. – URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ne/ne7.htm> (дата обращения 4.10.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
2. А.А. Балдин, А.И. Берлев, М. Параипан, С.И. Тююнников. Оптимизация пучка ускорителя для электроядерного способа получения энергии // Письма в ЭЧАЯ. – 2017. – Т. 14. – № 1(206). – С. 75-84.
3. Jian Deng, Qi Lu, Di Wu, et al. Sub-channel code development of lead-bismuth eutectic fast reactor available for multiple fuel assembly structures // Annals of Nuclear Energy. – 2020. – vol. 149.
4. Hashemi-Nezhad S. R. et al. Optimal Ion Beam, Target Type and Size for Accelerator Driven Systems: Implications to the Associated Accelerator Power // Ann. Nucl. Energy. – 2011. – vol. 38. – P. 1144-1155.
5. Кошкарев Д.Г. Соболевский Н.М., Бархударян А.В. Использование электроядерного метода в энергетике // АЭ. – 2008. – № 105(3).
6. Tran Minh Tien. Distribution of Neutrons from The Reaction (p, n) on the Liquid Lead Target in The Accelerator Driven System Reactor // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – vol. 1172.
7. D. Vandeplassche and L. Medeiros Romao. Accelerator driven systems : сайт. – Москва. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2012/papers/moyap01.pdf> (дата обращения 5.10.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
8. И. Киевицкая. Исследования нейтронно-физических характеристик подкритических систем на стенде «ЯЛІНА» // Журнал Белорусского Государственного Университета. – 2018. – № 3. – С. 41-50.
9. Ned Xoubi. Neutronic design study of accelerator driven system (ADS) for Jordan subcritical reactor as a neutron source for nuclear research // Applied Radiation and Isotopes. – 2018. – vol. 131. – P. 71-76.

10. Смонтирован ускоритель для нового бельгийского исследовательского реактора Myrrha : сайт. – Кассель. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/07/22/105656> (дата обращения 5.10.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

11. MYRRHA Home Page : сайт. – Брюссель. – URL: <https://myrrha.be/> (дата обращения 8.10.2020) (дата обращения 5.10.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

12. Китай - реакторы CLEAR : сайт. – Москва. – URL: <http://atominfo.ru/newst/a0419.htm> (дата обращения 12.10.2020) (дата обращения 5.10.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

13. Overview of PbBi cooled Reactor development and ADS Program in China : сайт. – Вена. – URL: [http://www-naweb.iaea.org/NAPC/Physics/meetings/CN-188-WEB-Presentations/Session%20C/C11%20Bai\\_China.pdf](http://www-naweb.iaea.org/NAPC/Physics/meetings/CN-188-WEB-Presentations/Session%20C/C11%20Bai_China.pdf) (дата обращения 12.10.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

14. Реакторы–выжигатели высокорadioтоксичных отходов переработки отработавшего топлива АЭС : сайт. – Киев. – URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-4/part-1/section-8/> (дата обращения 6.10.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

15. Arzhannikov A., Bedenko S., Shmakov V., Knyshev V., Lutsik I., Prikhodko V., Shamanin I. Gas cooled thorium reactor at various fuel loadings and its modification by a plasma source of extra neutrons // Nuclear Science and Techniques. – 2019. – Vol. 30. – № 181. – P. 111.

16. Kandiev Y.Z., Kashaeva E.A., Khatuntsev K.E. PRIZMA status // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 82. – P. 116-120.

17. Nuclear Energy Agency : сайт. – Париж. – URL: [https://oecdnea.org/dbdata/data/nds\\_eval\\_libs.htm](https://oecdnea.org/dbdata/data/nds_eval_libs.htm) (дата обращения 03.03.2020). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

18. Российская Федерация. Законы. Об основах охраны труда в Российской Федерации (с изменениями на 26 декабря 2005 года) : Федеральный закон № 181-ФЗ : [Принят Государственной Думой 23 июня 1999 года]. – Москва, 1999. – 20 с.

19. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.05.2021) : Федеральный закон №197-ФЗ : [Принят Государственной Думой 21 декабря 2001 года]. – Москва, 2001. – 424 с.

20. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : дата введения 01-03-2021. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=656010> (дата обращения 13.04.2021).

21. Анализ сертификации рабочего места : сайт. – Киев. – URL: <http://www.goldedu.ru/golds-649-1.html> (дата обращения 13.04.2021). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

22. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация: дата введения 01-03-2017. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071/titles> (дата обращения 13.04.2021).

23. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий: дата введения 15-06-2003. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901859404> (дата обращения 13.04.2021).

24. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки: дата введения 31-10-1996. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901703278> (дата обращения 13.04.2021).

25. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: дата введения 31-10-1996. – URL: <https://base.garant.ru/4173106> (дата обращения 13.04.2021).

26. ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере: дата введения 01-07-2007. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030047>(дата обращения 13.04.2021).

27. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов: дата введения 01-07-1986. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (дата обращения 13.04.2021).

28. Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению : сайт. – Дронтен. – URL: [https://studbooks.net/2078181/geografiya/analiz\\_vrednyh\\_proizvodstvennyh\\_faktoro\\_v\\_obosnovanie\\_meropriyatiy\\_ustraneniyu](https://studbooks.net/2078181/geografiya/analiz_vrednyh_proizvodstvennyh_faktoro_v_obosnovanie_meropriyatiy_ustraneniyu) (дата обращения 13.04.2021). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

29. СНиП 41-01-2003. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Отопление, вентиляции и кондиционирование: дата введения 01.01.2004. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035579> (дата обращения: 19.04.21). – Текст: электронный.

30. Интернет магазин 220 Вольт : сайт. – Москва. – URL: <https://tomsk.220-volt.ru> (Дата обращения 16.05.2021). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

31. Нервно-психические перегрузки. Рабочие средства измерения опасных и вредных производственных факторов : сайт. – Дронтен. – URL: [https://vuzlit.ru/121920/fizicheskoe\\_vozdeystvie](https://vuzlit.ru/121920/fizicheskoe_vozdeystvie) (Дата обращения 16.04.2021). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

32. Глава Б2.2. Организационные мероприятия, обеспечивающие безопасность работ : сайт. – Москва. – URL: <https://base.garant.ru/178483/d5014911228c1ee9c0079d2dd1cee739> (Дата обращения 16.04.2021). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

33. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (с изменениями на 27 декабря 2018 года) : Федеральный Закон № 123-ФЗ : [Принят Государственной Думой 4 июля 2008 года]. – Москва, 2018. – 103 с.

34. МЧС России: официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://www.mchs.gov.ru/> (Дата обращения 27.04.21). – Текст: электронный.

35. Газпром: памятка по предотвращению падения работников на поверхности одного уровня: сайт. – Москва. – URL: <http://www.mrgkbr.ru/wp-content/uploads/%202020/08/ПАМЯТКА-по-предотвращению-падения-работников-на-поверхности-одного-уровня.pdf> (Дата обращения 16.04.2021). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

36. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений – Взамен СНиП 2.01.02-85 : дата введения 01.01.1998. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/871001022> (дата обращения: 19.04.21). – Текст: электронный.

## Приложение А

(справочное)

### Introduction

Research of operation of DT-neutron generator in stationary and pulse-periodic modes of operation

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM92	Полозков Сергей Дмитриевич		

Консультант школы отделения (НОЦ) ИЯТШ, ОЯТЦ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беденко С.В.	канд. физ.-мат. наук		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сидоренко Т.В.	канд. пед. наук		

## Introduction

In today's developing world, the demand for energy resources is increasing every year. The scarcity of mineral resources determines the need for the most efficient use of fuel materials, which is most related to the supply of raw materials for power generating systems. In addition, there is a growing need to develop deposits in remote and inaccessible regions of the world. In the near future, in solving these problems, nuclear power technologies may become the most effective means.

Nuclear energy occupies a significant share in the energy supply of all developed countries. The unique features of nuclear power plants make it possible to speak of the generation of electricity and heat at them as the «cleanest» and most efficient way of generating electricity. The most widespread in the world are thermal reactors that use light water as a coolant, the so-called light water reactors. Such reactors, in the overwhelming majority, use uranium as fuel, the production and processing technology of which is well developed.

During the operation of a nuclear reactor, the fuel is in hard radiation fields, which leads to the formation of a large number of minor actinides (Am, Cm, Cf), this circumstance significantly complicates the work with spent nuclear fuel. Various Russian and foreign scientific works have repeatedly shown that nuclear fuel, in which  $^{232}\text{Th}$  is used as a fertile (feed) nuclide, has a number of significant advantages over uranium fuel (fertile nuclide –  $^{238}\text{U}$ ), one of which is the lower specific activity of SNF. However, despite the fact that the development and study of the thorium nuclear fuel cycle in Russia has been carried out for quite a long time, technically and economically this direction has not received proper development, since it requires a large amount of investment. Nevertheless, the need for the developed technologies may appear in the near future, since the rate of consumption of uranium raw materials is constantly growing in connection with the construction of new nuclear power plants. Further development and research of thorium NFC will allow financially and economically to identify the advantages of thorium-based fuel, and thereby attract new investments.



A high-temperature thorium reactor with the removal of heat energy by helium flows seems to be the most suitable for use in the northern sparsely populated and inaccessible regions of the Russian Federation. To obtain a thermal power of 60 MW from such a reactor, the neutron flux density in the critical assembly of the reactor core must be  $(3-4) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  in its stationary mode of operation. The main feature of power generation using thorium fuel is the lack of neutrons at each cycle of the nuclear chain reaction, which forces the attraction of a source of additional neutrons entering the blanket of the reactor. The process of fusion of heavy hydrogen isotopes (deuterium and tritium) in plasma at high temperatures can serve as such a source of additional neutrons.

The paper investigates the features of the spatial kinetics of an innovative hybrid nuclear power plant with an extended neutron source based on a magnetic trap. The fusion-fission facility under study includes a reactor facility, the core of which consists of an assembly of thorium-plutonium fuel blocks of a unified design and a long magnetic trap that permeates the near-axial region of the core. In the studied configuration of the hybrid installation, the high-temperature plasma filament GDT-FNS is formed in a pulse-periodic mode, and at a certain duty cycle, one should expect the formation of a fission «wave» diverging from the axial part of the system, propagating through the volume of the fuel block assembly in correlation in time with a pulsed source of fast DT-neutrons. Under these conditions, it becomes necessary to study the process of propagation of the «wave» of fission and, accordingly, the formation of the distribution of energy release in the volume of the blanket of the installation.

Purpose of the work: to study the operation of the neutron generator in stationary and pulse-periodic modes of operation. The tasks of this work are as follows:

- a) prepare constant support and create a design model of the installation;
- b) investigate the pulse-periodic and stationary operation of the DT-generator;
- c) perform neutron-physical optimization of the installation blanket;
- d) simulate the movement of the control and protection rods.

## **Accelerator-driven system**

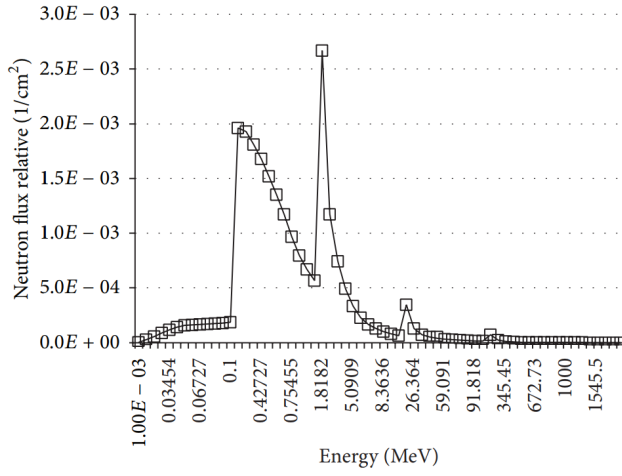
Accelerator-driven system (ADS) is a type of power nuclear reactor, consisting of a subcritical reactor and a high-energy accelerator, which serves to produce neutrons that cause a fission reaction that releases enough energy to power the accelerator and generate additional energy. [1]

The idea of using high-current accelerators in combination with subcritical reactors to generate energy was proposed by Bauman and later by Rubbia.

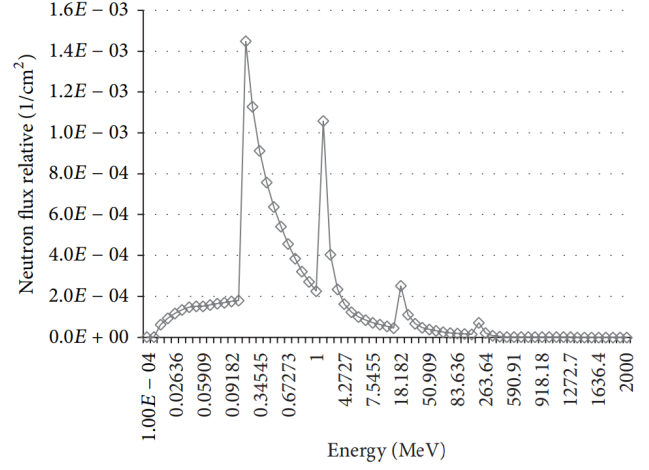
Neutrons in ADS are produced by hitting heavy elements target with proton beam. Such a reaction requires proton energies above several hundred MeV. At a beam energy of 1 GeV, approximately 20-30 neutrons are produced from one incident proton. The optimal beam energy is 2-4 GeV [2]. The number of neutrons produced per proton beam depends on the beam profile, proton energy, target material, size and geometry [3]. In addition, the number of neutrons increases due to the fission process [1].

At the same time, the possibilities of using beams of light ions instead of protons have not been sufficiently studied. In research [4], it is argued that nuclei heavier than tritium are poorly suited for creating ADS systems, while in [5] it was shown that the most efficient would be the use of  $\text{Ne}^{20}$  nuclei with an energy of about 3 GeV/nucleon, which agrees with the results of [2]. In addition, the use of light nuclei reduces the radiation load on the structural elements of the accelerator.

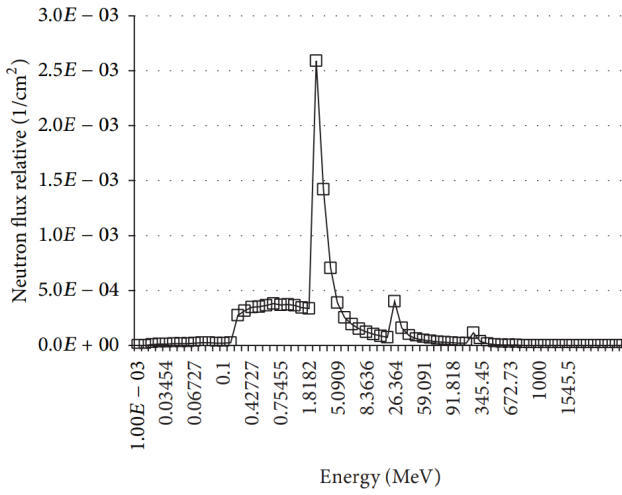
Figure A.1 shows the dependence of the volume of neutrons obtained by irradiation with 2 MeV protons beam [4]:



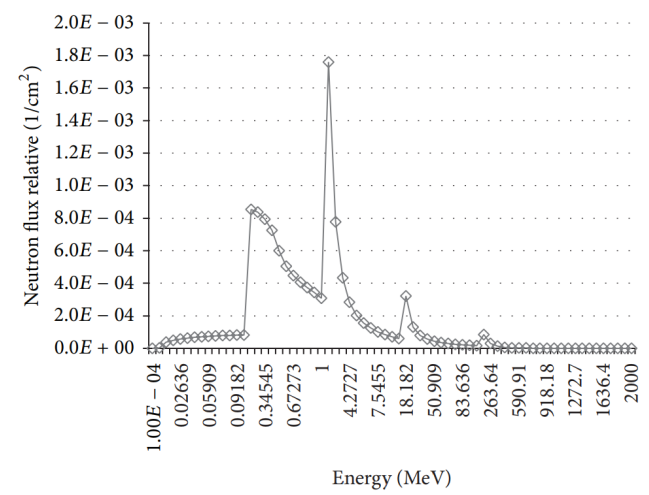
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A.1 – Spectrum of neutrons obtained as a result of the knockout reaction on targets from: (a) - U, (b) - W, (c) - PbBi, (d) - Hg

In the case of a critical reactor, there is a balance between neutron losses and their increase due to multiplication. This steady state can also be obtained in a subcritical assembly in the presence of an external neutron source. In this case, the subcritical assembly increases the number of initial neutrons by a factor of  $n$  [7]:

$$n = \frac{1}{1 - k_{eff}} \quad (\text{A.1})$$

where  $n$  is neutron multiplication;

$k_{eff} < 1$  is effective neutron multiplication factor.

The total number of neutrons is controlled by the power of an external source. This is a conceptual advantage of ADS, the power of which is determined solely by the intensity of the proton beam (at a constant level of subcriticality). In practice, the level of subcriticality of such a system is in the range from 0.95 to 0.98.

The current of the control proton beam is determined by the formula:

$$I_b = \frac{(1-k)P}{n f E_f} , \quad (\text{A.2})$$

where  $P$  is thermal power of the reactor;

$f$  is the fraction of neutrons causing fission;

$E_f$  is the amount of energy released in one division.

The ADS system consists of three main components: a high-energy charged particle accelerator, a target unit, and a subcritical blanket. In this case, the study of the relationship between the accelerator and the target unit, as well as the subcritical reactor is a rather difficult problem [8].

The figure A.2 schematically shows an ADS device. It includes: a high-energy proton accelerator with an energy of  $\sim 1$  GeV and a current of  $\geq 10$  mA, a target of heavy elements (Pb, W, U), a subcritical core where fission occurs under the action of fast neutrons, thermal neutrons, or their combination. According to calculations carried out in [9], a lead target has a very insignificant effect on the reactivity of the core, absorbing only 0.19 % of the neutrons in the core.

Lead coolant has the advantages of low working pressure, significant neutron saving, high outlet temperature. Moreover, the lead cooled reactor is expected to be the first fourth generation nuclear system for industrial demonstration and commercial use. Compared to a nuclear system with a sodium fast reactor, the lead-bismuth eutectic has a higher boiling point, better passive characteristics and a better core miniaturization potential, which can further significantly reduce lead corrosion of the facility materials [8].

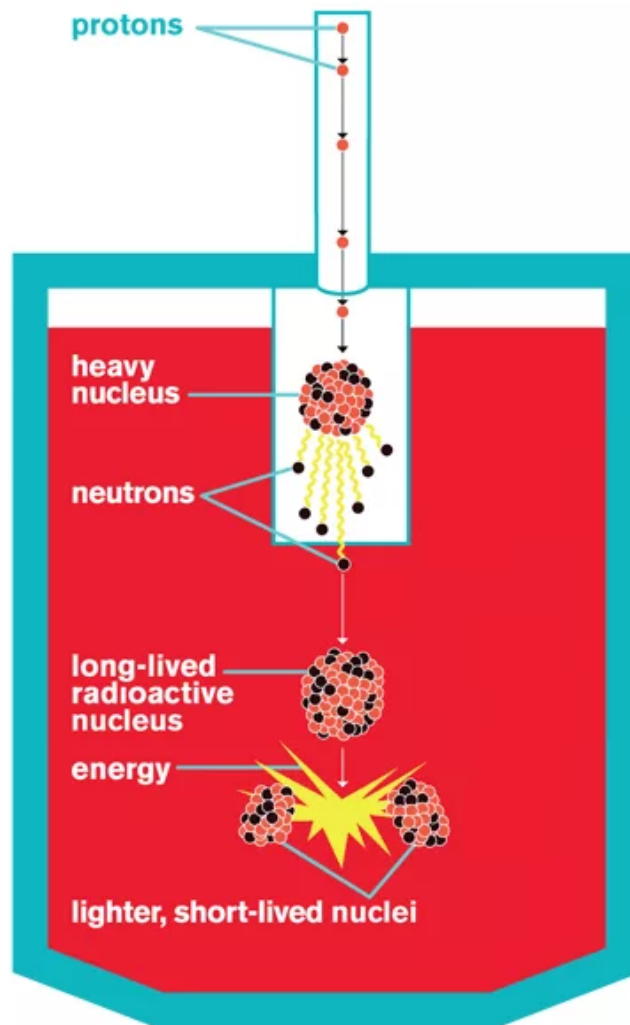


Figure A.2 – Scheme of subcritical reactor device controlled by an accelerator

As a result of the reaction, neutrons are emitted from the target, which cause chain reactions in the core. Except for the high-energy part, the neutron spectrum does not differ much from the fission neutron spectrum.

In critical assemblies, efficient transmutation of minor actinides can be achieved. However, due to the small fraction of delayed neutrons, there is a problem of control and safety in such assemblies. In fast reactors, uranium or thorium must be added to the fuel to ensure safety when burning minor actinides [1]. The ADS concept provides an alternative to this solution. The subcritical assembly is controlled through the intensity of an external source rather than through reactivity control. When the accelerator is turned off, the fission process stops. Hence, from a safety point of view, a much higher content of minor actinides can be assumed [1].

ADS is well suited to burn fuel that produces small amounts of delayed neutrons, and in critical reactors lead to poor management of criticality levels. In ADS, in principle, it is possible to burn pure minor actinides, and many times, until they are completely burned up. This reduces their content in waste by hundreds of times compared to waste in a single cycle.

Electronuclear method of neutron generation, based on the use of the nuclear reaction of fission of target nuclei of heavy elements by protons accelerated to high energies (1–1.5 GeV), is an alternative to methods using the reactions of fusion T (d, n) and fission (n, f). Theoretical studies of this method and experiments on it began in 1949 with the MTA project at the Lawrence Radiation Laboratory in Livermore and from the mid-60s in the USSR (JINR, Dubna). [1]

At first, the goal was to obtain secondary fissile material using the uranium-plutonium or thorium-uranium scheme. When the need for an electronuclear method for the production of such material disappeared, the purpose of these installations was to generate neutrons. After that, these installations are focused on the destruction of radioactive waste from nuclear power plants in combination with the generation of secondary fuel from natural uranium or thorium, the use of which would compensate for the costs of the destruction of radioactive waste. Among the various schemes for electronuclear power generation, a natural uranium nuclear reactor driven by a Linear Accelerator Driven Reactor (LADR) proton accelerator with a deeply subcritical core ( $k_{eff} = 0.9$ ) was considered. The power amplification factor introduced into the core of such a reactor reached  $\sim 5$  and was estimated by the ratio:

$$P = 1 + \frac{E_f}{E_p} \cdot \frac{k_{eff}}{1 - k_{eff}} \cdot \frac{n}{\nu} \cdot \eta_p \cdot \eta_y , \quad (A.3)$$

where  $E_f$  and  $E_p$  are the fission energy ( $\sim 200$  MeV) and protons respectively;  
 $n$  is the number of neutrons per proton produced in the converter target;  
 $\nu$  is the number of neutrons per fission act;  
 $\eta_y$  and  $\eta_p$  are efficiency accelerator and reactor respectively.

Currently, all the developed concepts of such systems at CERN, JAERI, CEA, LANL, etc. are based on the fast neutron spectrum in the subcritical assembly.

The multiplication of neutrons by a subcritical blanket allows one to reduce the energy of accelerated protons and the beam current of the accelerator generating neutrons in the reactor core. In addition, the efficiency of proton generation by the accelerator becomes less important. The energy cost of neutrons generated in the subcritical blanket turns out to be low enough to compensate for the energy costs for accelerating primary particles. A decrease in the proton energy to  $\sim 200\text{--}300$  MeV makes it possible to obtain an almost isotropic distribution of neutrons from the converter to the core, which does not differ in energy distribution from the spectrum of fission neutrons. This eliminates the need to form the energy spectrum of neutrons from the target-converter using special moderators. In the spectrum of neutrons generated by protons with  $E_p = 300$  MeV, 89 % of neutrons have an energy less than 15 MeV [8].

The main requirement for the accelerator is an operation mode compatible with the steady state operation of the reactor, i.e. the beam must work continuously. However, the steady state must be periodically disturbed in order to control the level of reactivity. For this purpose, it is planned to interrupt the beam with a duration of about 200  $\mu\text{s}$  to track the reactivity [3]. Interruptions have a duration corresponding to 4-5 reactor periods and occur with a frequency of more than 1 Hz.

The beam power is about 1 MW and its current is 4 mA in the demonstration assemblies of the presented system. In industrial installations, the current will be up to 20 mA.

The most promising accelerator used today is a superconducting linear accelerator. The main arguments in favor of a linear accelerator are the current carrying capacity of the beam, the possibility of modernization, and modularity. The main advantages of superconductivity are compactness, power consumption during continuous operation.

Subcritical systems controlled by high-energy charged particle accelerators are considered as the most promising for solving key problems of atomic energy:

- a) safety of nuclear power plants and nuclear fuel cycle facilities;
- b) environmental problems, including those associated with the disposal of radioactive waste and the use of spent nuclear fuel;
- c) limited supplies of uranium fuel.

To implement ADS systems, it is necessary to solve a number of physical and technical problems:

- a) choose the energy and current of the proton beam and create an accelerator with the required parameters;
- b) select the target material and create its optimal design for obtaining fission neutrons;
- c) develop a scheme for removing heat in the target block;
- d) to develop a scheme and design of a subcritical blanket and ensure nuclear safety;
- e) to develop a scheme for removing heat in a subcritical blanket;
- f) to determine the rate of reactions of transmutation of long-lived nuclides and the rate of their production.

Advantages of ADS:

- a) the subcriticality of the core excludes the possibility of undesirable acceleration of the reactor when the accelerator is turned off, the reaction quickly fade out;
- b) the possibility of using thorium;
- c) ADS produces little plutonium. Moreover, plutonium in the ADS can be efficiently burned, which has a positive effect on the problem of nuclear nonproliferation;
- d) the need for an expensive and energy-consuming enrichment procedure is eliminated;



e) the ability to produce fissile materials from non-fissile ones for their further use in subcritical and critical systems;

f) the ability to convert some isotopes present in nuclear waste, for example, actinides and fission products, reducing their contribution to radioactivity in geological repositories;

g) less radioactive waste is produced. The ADS waste should have coal ash activity after 500 years.