

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

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»  
Кафедра Техническая физика

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Исследование перспектив использования лития для нейтрон-захватной терапии

УДК 615.47:616 006:539.163:546.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Тюделеков Евгений Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТФ	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техническая физика	Шаманин И.В.	д.ф.-м.н.		

Томск – 2016 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P1	Способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности, расширять и углублять свое научное мировоззрение.
P2	Готовность к созданию новых методов расчета современных физических установок и устройств, разработке методов регистрации ионизирующих излучений, методов оценки количественных характеристик ядерных материалов.
P3	Способность применять экспериментальные, теоретические и компьютерные методы исследований в профессиональной области.
P4	Способность самостоятельно выполнять экспериментальные или теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современной техники и методов расчета и исследования
P5	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.
P6	Способность провести расчет, концептуальную и проектную проработку современных физических установок и приборов
P7	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.
P8	Способностью 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.
P9	Способность на практике применять знание основных понятий в Области интеллектуальной собственности, прав авторов, предприятия-работодателя, патента обладателя, основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
P10	Способность проводить поиск по источникам патентной информации, определять патентную чистоту разрабатываемых объектов, подготавливать первичные материалы к патентованию изобретений, официальной регистрации компьютерных программ и баз данных

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

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки 14.04.02. «Ядерная физика и технологии»  
Кафедра Техническая физика

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ И.В. Шаманин  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4Б	Тюделекову Евгению Александровичу

Тема работы:

Исследование перспектив использования лития для нейтрон-захватной терапии	
Утверждена приказом директора ФТИ	№791/с от 04.02.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Исследовать перспективы по использованию лития в качестве изотопа с высоким сечением поглощения нейтронов для нейтрон-захватной терапии.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	При разработке магистерской диссертации должны быть рассмотрены следующие вопросы: <ol style="list-style-type: none"><li>1. Обзор и анализ метода нейтрон-захватной терапии, видов изотопов и нейтронов, используемых в ней.</li><li>2. Расчет основных показателей эффективности нейтрон-захватной терапии, как метода лечения опухолевых заболеваний.</li></ol>

	<p>3. Расчетное подтверждение перспектив использования лития, в качестве радиочувствительного элемента.</p> <p>4. Экономическое обоснование проведения НИР. Выводы по работе. Заключение.</p>
--	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент каф. мен. ИСГТ Верховская Марина Витальевна
Социальная ответственность	Ассистент каф. ПФ ФТИ Гоголева Татьяна Сергеевна
По иностранному языку	Старший преподаватель каф. ИЯ ФТИ Ермакова Янина Викторовна

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТФ ФТИ	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Тюделеков Евгений Александрович		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0АМ4Б	Тюделекову Евгению Александровичу

<b>Институт</b>	<b>ФТИ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Технической физики</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные физика и технологии»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материалов Размер окладов и выплат исполнителям проекта
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Согласно проектной документации
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	Разработка анализа конкурентоспособности
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Планирование работ; построение иерархической структуры ВКР
3. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	График проведения ВКР – диаграмма Ганта
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка сравнительной и финансовой эффективности

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

1. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
2. *Матрица SWOT*
3. *График проведения и бюджет НИИ*
4. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ*

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Верховская М.В.	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0АМ4Б	Тюделеков Евгений Александрович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 0АМ4Б	ФИО Тюделекову Евгению Александровичу
-----------------	--

Институт	ФТИ	Кафедра	Технической физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 «Ядерные физика и технологии»

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

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ.</li> </ul>

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

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

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

### Задание выдал консультант:

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

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Тюделеков Евгений Александрович		

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

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»  
Уровень образования Магистратура  
Кафедра Технической физики  
Период выполнения (весенний семестр 2015/2016 учебного года) \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
17.03.2016	Разработка ТЗ на ВКР	20
24.03.2016	Составление и утверждение технического задания	10
25.03.-31.03.2016	Выбор направления исследования и способов решения задач	10
1.04.-14.04.2016	Сбор и изучение научно-технической литературы	10
15.04.-18.04.2016	Подбор формул и методики расчета параметров	5
19.04.-20.05.2016	Проведение расчетов для трех видов элементов и двух видов нейтронов	10
21.05.-23.05.2016	Анализ и обработка полученных результатов	5
24.05.2016	Обобщение и оценка эффективности полученных результатов	5
25.05.-02.06.2016	Оформление пояснительной записки	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТФ	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техническая физика	Шаманин И.В.	д.ф.-м.н		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 91 страница, 14 рисунков, 25 таблиц, 28 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: источники нейтронов, нейтрон-захватная терапия, ультрахолодные нейтроны, сечение реакции, энергия реакции.

Актуальность данной темы заключается в реализации и развитии метода нейтрон-захватной терапии, использование которого оправдано возможностью селективного поражения раковых клеток и сохранения здоровых клеток в области опухоли при минимальной радиационной и химической травматичности организма пациента в целом.

Объектом исследования является изотоп лития.

Цель работы: определение основных параметров нейтрон-захватной терапии для выявления перспектив использования лития при лечении злокачественных новообразований в сравнении с другими изотопами.

Структура работы: выпускная квалификационная работа состоит из 4 частей: в первой части рассмотрены теоретические основы нейтрон – захватной терапии, источники нейтронов, применяемые изотопы, а так же реакции взаимодействия изотопов с нейтронами; во второй – приведены методика расчета основных параметров нейтрон-захватной терапии, результаты расчетов для трех видов элементов и двух видов нейтронов; в третьей части осуществлен экономический расчет затрат на проведение выпускной квалификационной работы, составлен план-график работ; в четвертой – рассмотрена охрана труда и техника безопасности при выполнении выпускной квалификационной работы.

Область применения: исследования относятся к ядерной медицине, к лучевой терапии и могут быть использованы для реализации нейтрон-захватной терапии.

## Определения, обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Меланома: злокачественная опухоль, развивающаяся из меланоцитов – пигментных клеток, продуцирующих меланины.

Поглощенная доза: количество энергии излучения, которое поглощено в единице массы облучаемого вещества.

Термализация УХН: замедление нейтронов при их распределении в среде до тепловых энергий.

Мощность поглощенной дозы: доза, поглощаемая в единицу времени.

Сечение захвата: величина, характеризующая вероятность взаимодействия элементарной частицы с атомным ядром или другой частицей.

Скорость захвата: число актов реакции, ежесекундно происходящих с этими ядрами в  $1 \text{ см}^2$  среды.

Следующие обозначения и сокращения были применены в данной работе:

НЗТ – Нейтрон-захватная терапия;

УХН – Ультрахолодные нейтроны.

## Оглавление

РЕФЕРАТ .....	8
Определения, обозначения и сокращения .....	9
ВВЕДЕНИЕ .....	12
ГЛАВА 1 Обзорная часть .....	14
1.1 Нейтронно-захватная терапия.....	14
1.2 Источники нейтронов .....	16
1.2.1 Характеристики источников нейтронов .....	18
1.2.2 Ядерные реакторы.....	19
1.2.3 Нейтронные источники на базе ускорителей.....	22
1.2.4 Генератор ультрахолодных нейтронов .....	25
1.2.5 Исследовательский реактор бассейнового типа ИР – 8.....	29
1.3 Изотопы нейтронно-захватной терапии .....	32
1.3.1 Изотоп ${}^6\text{Li}$ .....	32
1.3.2 Изотоп ${}^{10}\text{B}$ .....	32
1.3.3 Изотоп ${}^{157}\text{Gd}$ .....	33
ГЛАВА 2 Практическая часть.....	35
2.1 Описание процесса проведения НЗТ .....	35
2.1 Методика проведения расчетов .....	37
2.2 Результаты расчетов и их обсуждение.....	41
ГЛАВА 3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	53
3.1 Предпроектный анализ .....	54
3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	54
3.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	55
3.1.3 SWOT-анализ.....	56
3.2 Инициация проекта .....	59
3.2.1 Организационная структура проекта .....	59
3.2.2 Контрольные события проекта .....	60

3.2.3 План проекта.....	61
3.3 Бюджет научного исследования .....	63
3.3.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.....	63
3.3.2 Основная заработная плата .....	66
3.3.3 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	68
3.3.4 Отчисления на социальные нужды .....	69
3.3.5 Научные и производственные командировки .....	69
3.3.6 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	69
3.3.7 Накладные расходы.....	70
3.4 Оценка сравнительной эффективности исследования .....	70
ГЛАВА 4 Социальная ответственность .....	73
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	74
4.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов .....	76
4.2.1 Организационные мероприятия.....	76
4.2.2 Требования безопасности при выполнении работ с использованием персональных электронно-вычислительных машин .....	77
4.2.2.1 Общие требования.....	77
4.2.3 Технические мероприятия.....	80
4.3 Электробезопасность .....	82
4.4 Пожарная и взрывная безопасность .....	84
Заключение. Выводы .....	86
Список публикаций.....	88
Список литературы .....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	92

## **ВВЕДЕНИЕ**

Здоровью человека всегда уделяли огромное внимание. В последнее время отмечается высокий рост числа онкологических заболеваний. Так в 2013 году в России было выявлено более 500 тысяч новых случаев злокачественных новообразований (54,2% у женщин, 45,8% у мужчин), что на 15,0% больше по сравнению с 2003 годом [1], поэтому исследования, направленные на диагностику и лечение такого рода заболеваний, имеют особый интерес и перспективу.

Актуальность данной темы заключается в реализации и развитии метода нейтрон-захватной терапии, использование которого оправдано возможностью селективного поражения раковых клеток и сохранения здоровых клеток в области опухоли при минимальной радиационной и химической травматичности организма пациента в целом.

Данные исследования могут быть использованы в медицине, а именно в лучевой терапии при предварительном введении препаратов в организм.

Существуют следующие основные методы лечения онкологических заболеваний: хирургический, лучевой и химиотерапевтический. Среди указанных методов особое внимание заслуживает лучевой, и в частности нейтрон-захватная терапия (НЗТ), реализация которой оправдана возможностью селективного поражения раковых клеток [2]. На данный момент в нейтронно-захватной терапии основным используемым элементом является  $^{10}\text{B}$ , разрабатываются аппараты и оборудования для его применения. Однако ведутся поиски и других веществ, которые возможно использовать в НЗТ.

Цель работы: определение основных параметров нейтрон-захватной терапии для выявления перспектив использования лития при лечении злокачественных новообразований в сравнении с другими изотопами.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обзор и анализ литературы в области нейтрон-захватной терапии онкологических заболеваний.

2. Составление методики теоретических расчетов основных параметров нейтрон-захватной терапии.

3. Проведение расчетов для трех видов изотопов и двух видов нейтронов.

4. Анализ и оценка полученных результатов для рассмотренных изотопов.

## ГЛАВА 1 Обзорная часть

### 1.1 Нейтронно-захватная терапия

Нейтрон-захватная терапия (НЗТ) – метод радиотерапии, при котором происходят реакции между нейтронами и радиочувствительными медикаментами. Способ осуществления нейтрон-захватной терапии онкологических заболеваний включает введение в пораженный орган или ткань человека медицинского препарата, содержащего изотоп с высоким сечением поглощения нейтронов, и последующее облучение пораженного органа или ткани нейтронами ядерного реактора.

Одним из перспективных методов, отвечающих требованиям увеличения эффекта радиационного воздействия и пространственно-временной оптимизации терапии, может в недалеком будущем стать НЗТ очень холодными и ультрахолодными нейтронами с кинетической энергией ниже  $10^{-4}$  и  $10^{-7}$  эВ соответственно. Уникальная особенность таких нейтронов – способность испытывать полное отражение от поверхности конденсированного вещества при любом угле падения и перемещаться по гибким нейтроноводам.

Способ осуществления нейтронно-захватной терапии онкологических заболеваний реализуют на установке, пример которой показан на рисунке 1.1.

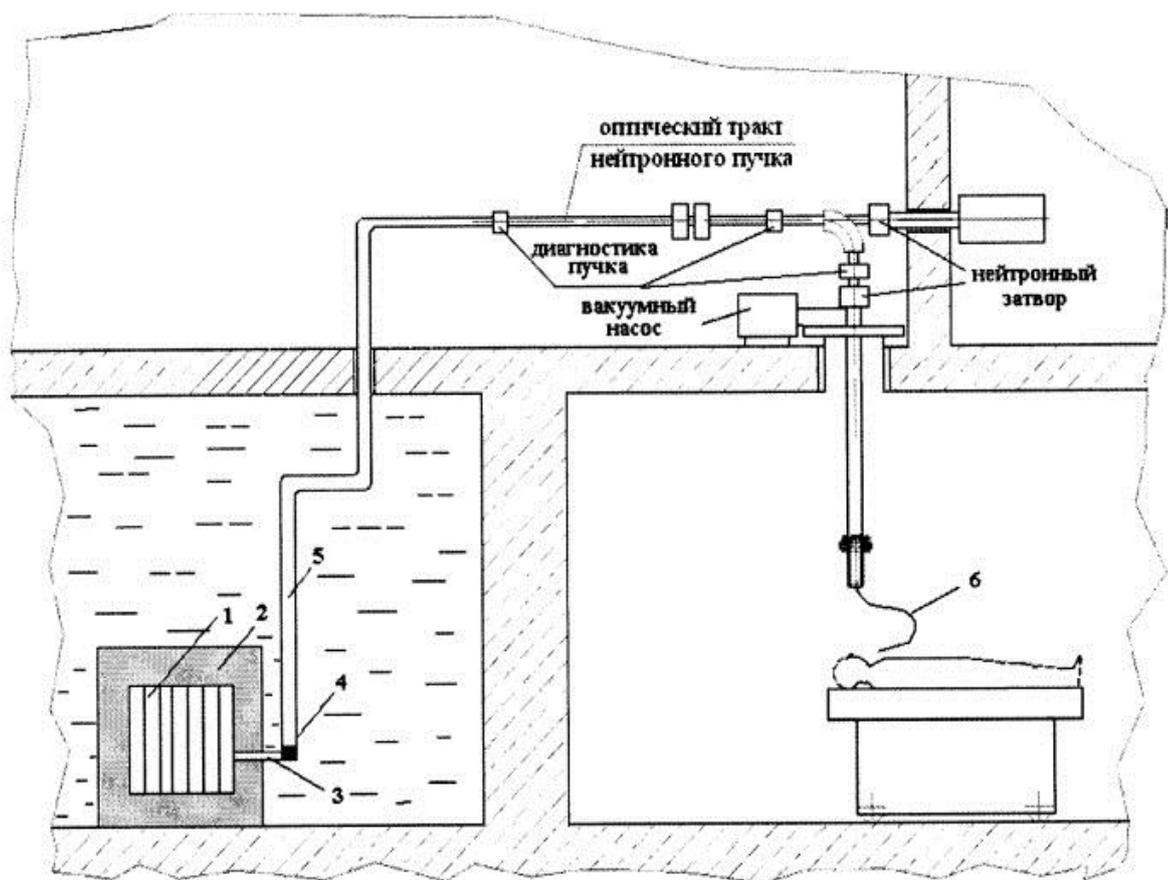


Рисунок 1.1 – Схема установки, используемой для нейтронно-захватной терапии

Установка состоит из активной зоны реактора 1, отражателя нейтронов 2, горизонтального канала 3, криогенного конвертора 4 – источника УХН, вакуумного нейтропровода 5 для доставки нейтронов к месту проведения медицинских процедур по нейтронно-захватной терапии, гибкого нейтропровода-катетера 6 для подвода нейтронов непосредственно к пораженному органу или тканям человека.

Нейтроны из активной зоны реактора 1 по касательному горизонтальному каналу 3 подают в низкотемпературный конвертер 4, заполненный жидким сверхтекучим гелием. Стенка конвертера выполнена из изотопа никеля, обеспечивающего полное отражение УХН на границе. Также с внешней стороны конвертер окружен тепловой и радиационной защитой.

В результате рассеяния на ядрах сверхтекучего гелия нейтрон теряет практически всю энергию. Нейтроны с энергией  $\sim 10^{-7}$  эВ и длиной

когерентного рассеяния меньше нуля через тонкое прозрачное окно подают в вакуумный нейтроновод 5, по которому транспортируются в экспериментальный зал, где проводят эксперименты или медицинские процедуры по НЗТ. В качестве материала стенки нейтроновода используют никель. Внутренняя поверхность нейтроновода покрыта безводородным маслом Фомблин  $(F_3CCF_2OCF_2CF_5)_n$  для снижения потерь УХН на стенках.

В случае необходимости пучок нейтронов может быть перекрыт с помощью нейтронных затворов, представляющих собой непрозрачный для ультрахолодных нейтронов экран, изготовленный из никеля.

Концевая часть нейтроновода выполнена в виде гибкого нейтроновода-катетера 6 сильфонного типа - тонкостенной металлической гофрированной трубки. По катетеру ультрахолодные нейтроны доставляют непосредственно к пораженному органу по пищеводу, ротовой полости, бронхам, мочевыводящим путям, прямой кишке или другим путем.

Предложенный способ осуществления инвазивной нейтронно-захватной терапии злокачественных опухолей позволяет за счет использования пучков ультрахолодных нейтронов минимизировать повреждения здоровых тканей пациента, транспортировать нейтронной пучок к глубоко залегающим опухолям, эффективно воздействовать на опухоли малого размера.

## **1.2 Источники нейтронов**

В 1935 году профессор Джеймс Чедвик был удостоен Нобелевской премии за открытие нейтронов [3]. Энрико Ферми в 1942 году показал, что нейтроны, которые образуются в результате деления ядра урана, могут поддерживать контролируемую цепную реакцию. Еще раньше, в 1938 году, он был удостоен нобелевской премии за открытие того, что замедленные нейтроны легко взаимодействуют с окружающим веществом и могут быть использованы для определения положений и колебаний атомов вещества.

За прошедшие 50 лет все больше ученых в областях физики, химии, биологии, материаловедения, геологии и многих других обращаются к использованию нейтронного рассеяния в поисках ответов на наиболее сложные проблемы в их областях исследований.

В настоящее время рассеяние нейтронов практически уходит от изучения атомной и магнитной структуры и динамики простых кристаллов. Акцент все более делается на изучении наноструктур, разупорядоченных систем, сложных химических реакций, процессов катализа. Расширяется активность в области исследования сложных жидкостей, самоорганизующихся систем, экзотических электронных состояний.

Все эти задачи могут быть поставлены и решены только на современных высокопоточных источниках нейтронов: ядерных реакторах, где используется контролируемая реакция деления ядер урана или плутония, или испарительных источниках на базе протонных ускорителей при бомбардировке тяжелых ядер протонами высоких энергий. Поток нейтронов может быть либо постоянным, либо пульсирующим. При таких процессах производимые нейтроны имеют большие значения энергии, что требует дополнительной установки на источник замедлителей нейтронов. В результате формируется поток нейтронов с длинами волн, сравнимыми с межатомными расстояниями в жидкостях и твердых телах, с кинетическими энергиями, сравнимыми с динамическими процессами в веществе. Как правило, замедлители изготавливаются из алюминия и заполняются жидким водородом, или жидким метаном (в зависимости от необходимых параметров выходящего нейтронного пучка).

Наиболее интенсивные источники нейтронов являются очень дорогими при создании и в обслуживании, и их количество в мире, вообще говоря, мало. В 1950 году был построен первый реактор, предназначенный непосредственно для научных исследований. Его единственной целью было производство как можно большей интенсивности нейтронного излучения. Со временем нейтронные источники превратились в универсальные научно-исследовательские установки, применимые в широком спектре

экспериментальных исследований. В настоящее время чуть больше 30 лабораторий в мире оборудованы средне- и высокопоточными нейтронными установками. Научно-исследовательские нейтронные источники являются исключительно источниками нейтронов и неприменимы для каких либо других целей.

Различают нейтроны ультрахолодные ( $10^{-7}$  эВ), холодные ( $10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3}$  эВ), тепловые и надтепловые ( $2,5 \cdot 10^{-2} - 0,5$  эВ), резонансные (0,5 эВ – 10 кэВ), которые имеют много резонансных пиков в зависимости эффективного сечения взаимодействия со средними и тяжелыми ядрами от энергии нейтронов, и промежуточные (10–100 кэВ). Приведенные значения граничных энергии условны. В действительности эти границы различны и зависят от типа явлений и конкретного вещества.

### **1.2.1 Характеристики источников нейтронов**

Нейтронные источники – это механизмы или вещества, которые излучают нейтроны. Для этого используются ядерные превращения и распад ядер.

Наиболее важные характеристики источников:

Энергетический спектр. Самым распространенным способом на сегодняшний день являются источники с непрерывным спектром в некотором промежутке энергии нейтронов. Экспериментальные ядерные реакторы предоставляют шанс получить пучки тепловых и медленных нейтронов, движущихся с постоянной частотой.

Поляризация нейтронных пучков. В неполяризованном пучке возможность получения обеих проекций спина нейтральной частицы по направлению пучка равновелика. Для изучения спиновых эффектов на экспериментальных реакторах возможно получение поляризованных пучков, в которых определённое направление проекции спина будет с наибольшей вероятностью.

Временная характеристика нейтронных пучков. Большинство основ нейтральных частиц являются основами непрерывного процесса. Для изучения нейтральных пучков созданы частицы импульсного действия.

Интенсивность нейтронных источников. Определяется величиной нейтронов, выделенных за единицу времени. Мощность потока нейтронов от изотопных источников имеет ограничение по активности: обычно меньше  $10^8$  частиц за единицу времени (секунду).

Угловое распределение интенсивности. Интенсивность излучения напрямую зависит от угла направления обстреливаемых частиц, направленных от источника в точку наблюдения. Понимание углового распределения помогает выбирать рациональные условия облучения и оценивать мощность пучка нейтральных частиц по всем направлениям.

### **1.2.2 Ядерные реакторы**

Существуют два основных метода для получения импульсного источника нейтронов:

- непрерывный пучок нейтральных частиц, летящих от источника перекрывают специальной механической заслонкой;

На рисунке 1.2 проиллюстрирован принцип действия одной из механической заслонок – прерыватель Ферми. При помощи двух заслонок можно формировать монохроматический пучок нейтральных частиц. Первая заслонка нужна для получения импульсного пучка. Вторая, установленная на известном расстоянии от первой - для его монохроматизации.

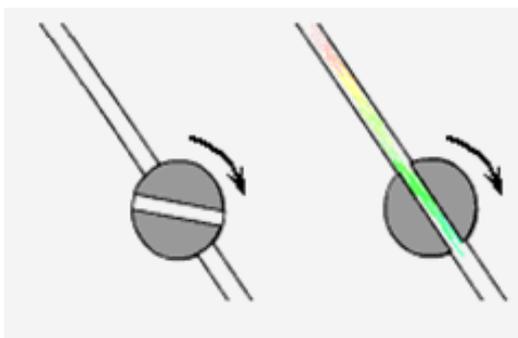


Рисунок 1.2 – Принцип работы прерывателя Ферми

Нейтроны с большей энергией долетают до второй заслонки намного быстрее, чем эти же частица, но с меньшими энергиями. Изучив скорость, с которой вращаются заслонки, можно добиться ситуации, когда вторая заслонка будет пропускать частицы, только в определенном энергетическом диапазоне.

- частицы, движущиеся с ускорением и имеющие заряд, в ускорителе на малое время отклоняют на мишень, в которой происходит ядерная реакция, результатом которой служит появление нейтральных частиц.

В качестве импульсного источника нейтронов используют также импульсные ядерные реакторы.

Различают три типа импульсных реакторов:

- ✓ периодические импульсные реакторы,
- ✓ самогасящиеся импульсные реакторы,
- ✓ бустеры.

В импульсных реакторах цепная реакция развивается на мгновенных нейтральных частицах. С помощью преобразователей реактивности, реактор на некоторый отрезок времени (от одной микросекунды до нескольких секунд), переходит в надкритическое состояние, когда коэффициент приумножения нейтральных частиц без учета запаздывающих нейтронов больше единицы. В реакторе с большой скоростью растет цепная реакция деления. Затем реактор переводят в подкритическое состояние и наблюдают процесс затухания. После этого вырабатываются импульсные нейтронные потоки с большей интенсивностью. Управление реактором при помощи мгновенных нейтронов очень опасное занятие.

Пульсирующие нейтронные источники, используемые в спектроскопии по времени пролета, могут быть механическими устройствами для низкоэнергетической области. Прерыватели для быстрых нейтронов с продолжительностью импульса примерно равной одной микросекунде дают еще весьма приемлемые потоки с разумным разрешением в энергетической области ниже 100.eV.

Ядерный реактор является источником непрерывного пучка медленных частиц. Нейтроны выводятся из реактора по специально созданным каналам, идущим от отражателя реактора, так же называемой активной зоной, сквозь защиту в лабораторию. Поток частиц на выходе канала из защиты реактора зависит от мощности нейтральных частиц в начале канала и от размеров самого канала. Пучок частиц перекрывают механической заслонкой, которая называется механическим прерывателем. Его располагают ближе к выходу нейтронного канала, чтобы защитить реактор. Механическая заслонка является «дверью» для прохода частиц на некоторое время, благодаря чему образуется импульс нейтральных частиц. Одной из наиболее распространенных конструкций заслонки считается вращающийся коллиматор, имеющий форму ротора с узкими щелями, расположенными по диаметру. В момент, когда щели параллельны пучку частиц, ротор пропускает их течение некоторого времени. Во время оставшегося времени вращения ротора пучок нейтральных частиц прерывается. На сегодняшний день, системы механических заслонок частиц имеют ротор диаметром 50-60 см, со скоростью вращения до 30000 об/мин. Механическая заслонка определяет основные характеристики импульса нейтронов.

В наше время ядерные реакторы пользуются высоким спросом для лечения раковых новообразований. Существует огромный выбор тестовых систем, на основе которых получены радиобиологические свойства плотно ионизирующих, комбинированных, смешанных радиационных воздействий, осуществлено формирование, исследование и внедрение в практику новых видов полей и пучков гамма-нейтронного и излучения нейтральными

частицами для медицинских и биологических целей. Совершенствуются расчетные и теоретические модели для описания радиобиологических действий и планирования лучевой терапии. В России импульсное нейтронное излучение (в том числе со сверхвысокими мощностями доз) в медицинских целях добывается на реакторе БАРС-6, а метод нейтрон–захватной терапии осуществляют на реакторе БР-10, дающем быстрые частицы.

### 1.2.3 Нейтронные источники на базе ускорителей

В последние годы в онкологии стала рассматриваться идея использования пучка эпитепловых ( $0,5 \text{ эВ} < E_n < 10 \text{ кэВ}$ ) нейтронов для осуществления методов нейтрон–захватной терапии злокачественных новообразований в клинике. Главными элементами установки для данного вида терапии является ускоритель протонов до энергии 3 МэВ и нейтроногенерирующая мишень ускорительного источника нейтронов.

Для ускорительных источников эпитепловых нейтронов, рассматриваются следующие реакции:  ${}^7\text{Li}(p,n)$ ,  ${}^9\text{Be}(p,n)$ ,  ${}^9\text{Be}(d,n)$  и  ${}^{13}\text{C}(d,n)$ . Характеристики этих реакций представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Ядерные реакции как источники тепловых нейтронов

Реакция	Энергия заряд. частиц, МэВ	Выход нейтронов при 10 мА, $\text{с}^{-1}$	Средняя энергия нейтронов, МэВ	Макс. Энергия нейтронов, МэВ	Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	Коэфф. Теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
${}^7\text{Li}(p,n)$	2,5	$8,9\cdot 10^{12}$	0,55	0,786	181	71
	1,915	$2,9\cdot 10^{11}$	0,04	0,113		
${}^9\text{Be}(p,n)$	4	$10\cdot 10^{12}$	1,06	2,21	1287	201
${}^9\text{Be}(d,n)$	1,5	$2,1\cdot 10^{12}$	2,01	5,81		
${}^{13}\text{C}(d,n)$	1,5	$1,8\cdot 10^{12}$	1,08	6,77	3350	230

Более эффективной реакцией генерации эпитепловых нейтронов является бомбардирование протонов по литию: сравнительно мягкий энергетический спектр и большой поток нейтронов. Однако химические, механические и тепловые свойства лития слабые. Другие мишени из  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^{13}\text{C}$  позволяют преодолеть трудности в изготовлении мишени и ее охлаждении, но для достижения сопоставимого потока нейтронов из мишени нужны более мощные пучки. Более того, замедление генерируемых из этих мишеней более энергетичных нейтронов до эпитепловых энергий требует использования более протяженных модераторов, а потому еще более мощных пучков, компенсирующих уменьшение потока эпитепловых нейтронов в области терапии. Таким образом, самой перспективной считается литиевая мишень [4].

При выборе мишени нужно учитывать следующие факторы:

1. Реакция  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  является более эффективной для генерации эпитепловых нейтронов, однако у лития низкая температура плавления, плохая теплопроводность и высокая химическая активность;
2. Для нейтрон–захватной терапии идеален энергетический спектр, в котором отсутствуют нейтроны с энергией ниже 0,5 эВ и выше 10 кэВ;
3. Каждый акт рождения нейтрона в результате реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  сопровождается появлением радиоактивного ядра изотопа бериллия. Генерация нейтронов на протяжении нескольких часов способна приводить к наведенной активности, препятствующей простому обращению с мишенью;
4. При имплантации 2 МэВ-ных протонов в твердые тела поверхностный слой способен менять форму вплоть до образования блистеров и отслаивания чешуек. Возникновение развитой поверхности мишени может не только приводить к усиленному испарению лития из-за уменьшения теплопроводности, но и вообще делать мишень негодной. Оцениваемая доза по блистерингу достигается за время, сравнимое со временем планируемого облучения (около 10 мин);
5. Неупругое рассеяние протонов на ядрах лития приводит к излучению  $\gamma$ -квантов с энергией 0,477 МэВ. В случае если протоны полностью

поглощаются в слое лития, поток  $\gamma$ -квантов сравним с потоком нейтронов и даже может его превышать. Значительное уменьшение этого паразитного потока  $\gamma$ -квантов можно достигнуть созданием литиевого слоя такой толщины, чтобы при прохождении этого слоя энергия протонов уменьшалась только до 1,882 МэВ – энергии порога реакции генерации нейтронов. Последующее поглощение протонов должно осуществляться в веществе (например, в фольфреме), в котором упругое рассеяние протонов не приводит к излучению  $\gamma$ -квантов;

б. Чистый литий наиболее эффективен для генерации нейтронов по сравнению с гидридом, нитридом, оксидом или фторидом лития, обладает более высоким коэффициентом теплопроводности, но имеет значительно меньшую температуру плавления и потому требует эффективного теплоотвода при желательной более низкой температуре литиевого слоя. Вероятно использование мишени с жидким литиевым слоем, однако существенное испарение лития повлечет за собой не только снижение высоковольтной электрической прочности из-за поступления паров лития, но и распространение возникающего радиоактивного изотопа бериллия по всей установке.

Оптимальной мишенью для сооружаемого источника нейтронов является неподвижная мишень с интенсивным жидкостным охлаждением.

Реакция  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  является пороговой и характеризуется быстрым ростом сечения реакции вблизи порога. Это свойство позволяет рассматривать дополнительную возможность работы в припороговом режиме, когда энергия протонов превышает на 30 – 40 кэВ порог реакции 1,882 МэВ. В таком случае кинематически коллимированный вперед нейтронный пучок со средней энергией 30 кэВ может быть прямо использован для нейтрон-захватной терапии. Поэтому для генерации нейтронов следует использовать реакцию  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  при энергии протонного пучка 1,915 или 2,5 МэВ.

Изотоп бериллия  ${}^7\text{Be}$  в результате захвата орбитального электрона с периодом полураспада в 53,6 дня превращается в стабильный изотоп лития  ${}^7\text{Li}$ . В 89,7 % случаев распад идет без излучения, а в 10,3 % — с испусканием  $\gamma$ -

кванта энергией 0,477 МэВ. Поскольку изотоп  ${}^7\text{Be}$  локализован только в литиевом слое приемника пучка, то в тот момент, когда наведенная активность  ${}^7\text{Be}$  приближается к 109 Бк, генерация нейтронов прекращается, установка выключается, приемник пучка снимается с установки, помещается в свинцовый ящик и переносится в удаленный отстойник.

Мишень имеет вид тонкого металлического диска диаметром 10 см, на который со стороны протонного пучка напыляется тонкий слой чистого твердого лития, а обратная сторона диска интенсивно охлаждается турбулентным потоком воды. Такая простая и легко заменяемая мишень дает решить проблему блистеринга и наведенной активности. Для обеспечения однородного температурного поля на поверхности мишени желательно иметь однородный протонный пучок диаметром 10 см, что может быть реализовано разверткой протонного пучка меньшего размера по всей мишени. Развертка с частотой более 100 Гц является оптимальной для того, чтобы максимальная температура слоя не превышала температуру плавления лития и флуктуации температуры были незначительны.

#### **1.2.4 Генератор ультрахолодных нейтронов**

Сущность работы: генератор включает ловушку, заполненную сверхтекучим гелием, помещенную в оболочку, выполненную из твердого дейтерия. Ловушка с оболочкой окружены теплоотражающим экраном и цилиндрическим слоем радиационного фильтра, выполненного из висмута и размещенного в ванне. Ловушка в оболочке с экраном и фильтром погружены в большой экспериментальный канал, размещенный в тяжеловодном отражателе.

Известны источники нейтронов, предназначенные для генерации холодных и ультрахолодных нейтронов и содержащие водород или дейтерий в жидком виде, размещенные в области отражателя тяжеловодных исследовательских реакторов. В таких устройствах нейтроны замедляются в материале низкотемпературного замедлителя до энергий  $10^{-8}$  -  $10^{-4}$  эВ. Затем

через тонкое окно (тонкую мембрану) или набор окон холодные нейтроны попадают в вакуумный нейтронпровод, по которому транспортируются в экспериментальный зал и разводятся на экспериментальные установки. Наиболее эффективными являются решения, реализованные в Институте Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ) в Гренобле (Франция) на дейтерии в качестве криогенного замедлителя [5] и в Петербургском Институте Ядерной Физики (ПИЯФ) на водороде в качестве криогенного конвертора нейтронов [6].

Известно устройство для эффективного накопления ультрахолодных нейтронов, содержащее стеночную ловушку ультрахолодных нейтронов, заполненную сверхтекучим гелием [7], снабженную средствами поддержания рабочей температуры и вакуума, а также средствами вывода ультрахолодных нейтронов. В этом устройстве гелий облучается холодными нейтронами с длиной волны около 10 Å, например от источника на жидком дейтерии при температуре 20 К. За счет эффекта возбуждения в сверхтекучем гелии однофононных осцилляций энергия нейтронов быстро уменьшается. Нейтроны, перешедшие в область ультрахолодных (скорость до 8 м/с в зависимости от граничной скорости, определяемой материалом стенки ловушки), накапливаются в ловушке за счет отражения от внутренней поверхности. Показано, что плотность УХН, полученных таким образом, превышает плотность УХН в спектре нейтронов с температурой 20 К (спектр теплового равновесия) на несколько порядков [8]. Таким образом, реализуется эффект сверхтеплового накопления нейтронов. Накопление возможно при тщательной очистке гелия 4 от примеси гелия-3. Если время хранения нейтронов в ловушке достаточно велико (более 100 секунд), то за счет фактора накопления пространственная плотность нейтронов возрастает по сравнению с проточным режимом. Если ловушка имеет затвор, то накопленные нейтроны можно периодически выпускать в примыкающие экспериментальное устройство или детектор нейтронов. В другом варианте эксперименты проводятся непосредственно в ловушке в среде сверхтекучего гелия с регистрацией электронов или протонов от распада нейтронов.

Схематически, пример вертикального разреза генератора ультрахолодных нейтронов показан на рисунке 1.3.

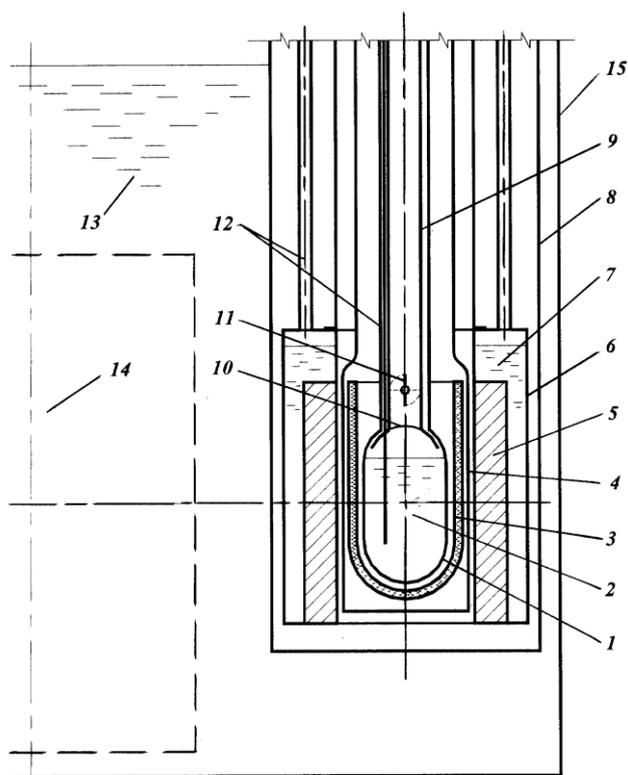


Рисунок 1.3 – Вертикальный разрез генератора ультрахолодных нейтронов

Генератор ультрахолодных нейтронов содержит ловушку 1 (с внутренним покрытием из материала с положительной амплитудой рассеяния нейтронов) с жидким гелием 2 при температуре, близкой к 1 К, помещенный в оболочку 3 из твердого дейтерия. Оболочка может быть реализована в виде тонкостенного сосуда, по форме подобного колбе с двойными стенками, между которыми заливается жидкий дейтерий. При понижении температуры дейтерий отвердевает (устройства для залива и охлаждения дейтерия не показаны). Стенки колбы могут быть выполнены из алюминиевого сплава или бериллия. Оболочка с ловушкой охвачена теплоотражающим экраном 4, отражающим лучистый внешний поток, и трубным радиационным фильтром 5, изготовленным из тяжелого материала с малым сечением захвата нейтронов (висмут), радиационный фильтр погружен в ванну 6, через которую

циркулирует жидкий криоагент 7, например жидкий азот. Все перечисленные компоненты размещены в вакуумированном канале 8, к сосуду с гелием примыкает нейтроновод 9, отделенный от сосуда мембраной 10 и нейтронным клапаном 11. В пространстве между нейтроноводом и каналом размещены трубопроводы 12 для подачи в рабочие полости криоагентов и откачки их паров. Канал помещен в тяжеловодный отражатель нейтронов 13 вблизи активной зоны 14 подкритического размножителя 15.

Генератор ультрахолодных нейтронов работает следующим образом. Быстрые нейтроны от внешнего источника, например мишени, на которую падает пучок ускоренных протонов, замедляются в подкритическом размножителе 15 и инициируют цепную реакцию деления ядер топлива (например, обогащенного урана), образующего активную зону 14. Нейтроны деления замедляются в тяжелой воде отражателя 13 и формируют в отражателе пространственное распределение тепловых нейтронов с широким максимумом на некотором расстоянии от активной зоны. Криоагенты подаются по трубопроводам 12. Быстрые нейтроны, тепловые нейтроны и гамма-кванты деления ядер облучают цилиндрический радиационный фильтр 5, охлаждаемый в ванне 6 до температуры жидкого азота. При облучении происходят процессы рассеяния и поглощения гамма-квантов, рассеяния быстрых и тепловых нейтронов, фильтрации холодных нейтронов сквозь висмут. Оболочка из твердого дейтерия дополнительно конвертирует нейтроны из области тепловых энергий в холодную область. В результате экранировки и фильтрации жидкий гелий 2 в ловушке 1 облучается потоком преимущественно холодных нейтронов с длиной волны более 8 ангстрем. Суммарное тепловыделение в объеме ловушки 1 не превышает 1 Вт, что позволяет за счет откачки паров охладить жидкий гелий до температуры 0,95 - 1,05 К и добиться состояния сверхтекучести. В этом состоянии гелия происходит эффективный процесс взаимодействия холодных нейтронов с молекулярной структурой жидкости, приводящий к возбуждению однофононных колебаний.

Таким образом, энергия нейтронов эффективно отбирается и распределяется по объему сверхтекучей жидкости, и нейтроны переходят в ультрахолодную область энергий. Процесс обратной передачи энергии сильно подавлен за счет быстрого распределения энергии возбуждений по объему гелия и откачки паров гелия, что поддерживает его температуру. Образовавшиеся ультрахолодные нейтроны (УХН) свободно мигрируют в объеме ловушки, отражаясь от специально обработанной внутренней поверхности.

### 1.2.5 Исследовательский реактор бассейнового типа ИР – 8

Исследовательский реактор бассейнового типа ИР–8 введен в эксплуатацию в ИАЭ им. И.В. Курчатова в 1981 году [9]. Проектная тепловая мощность реактора равна 8 МВт. Активная зона с размерами 280x280x600 мм окружена бериллиевым отражателем толщиной 300 мм. В качестве отражателя используется металлический бериллий толщиной 300 мм. Использование бериллия позволило существенно уменьшить объем активной зоны, а также обеспечить высокую плотность потока тепловых нейтронов в отражателе.

Особенности компоновки активной зоны реактора обеспечивают наилучшие для реакторов такого класса параметры нейтронного потока, как в активной зоне, так и в отражателе. Старая структура реактора при относительно небольших изменениях позволяет в перспективе повысить мощность реактора до 20 МВт. Реактор имеет 12 горизонтальных пучков (каналов), на которых размещены установки для нейтронного исследования конденсированных сред. Характеристики данного реактора представлены в таблице 1.2 [10].

Таблица 1.2 – Характеристики ИР – 8

Максимальная мощность, МВт	8,0
Число ТВС в активной зоне, шт	16
Объем активной зоны, л	47,4

Продолжение таблицы 1.2

Максимальная плотность потока нейтронов, Тепловых:	$n/cm^2 \cdot c$
- в активной зоне	$1,5 \cdot 10^{14}$
- в сменных бериллиевых блоках отражателя	$2,3 \cdot 10^{14}$
Быстрых ( $E > 3$ МэВ):	
- в активной зоне	$5,7 \cdot 10^{13}$
- в сменных бериллиевых блоках отражателя	$1,8 \cdot 10^{13}$

В вертикальных каналах реактора имеется возможность облучения конструкционных материалов. Для этого используются соответствующие ампульные устройства (АУ), размещаемые в активной зоне. Опытные образцы размещаются в АУ, устанавливаемых в вертикальных каналах реактора ИР-8.

Для снижения уровня энерговыделения за счет поглощения гамма-излучения в конструкционных элементах АУ устанавливаются защитные экраны из вольфрама или из стали.

На рисунке 1.4 представлен продольный разрез реактора [11].

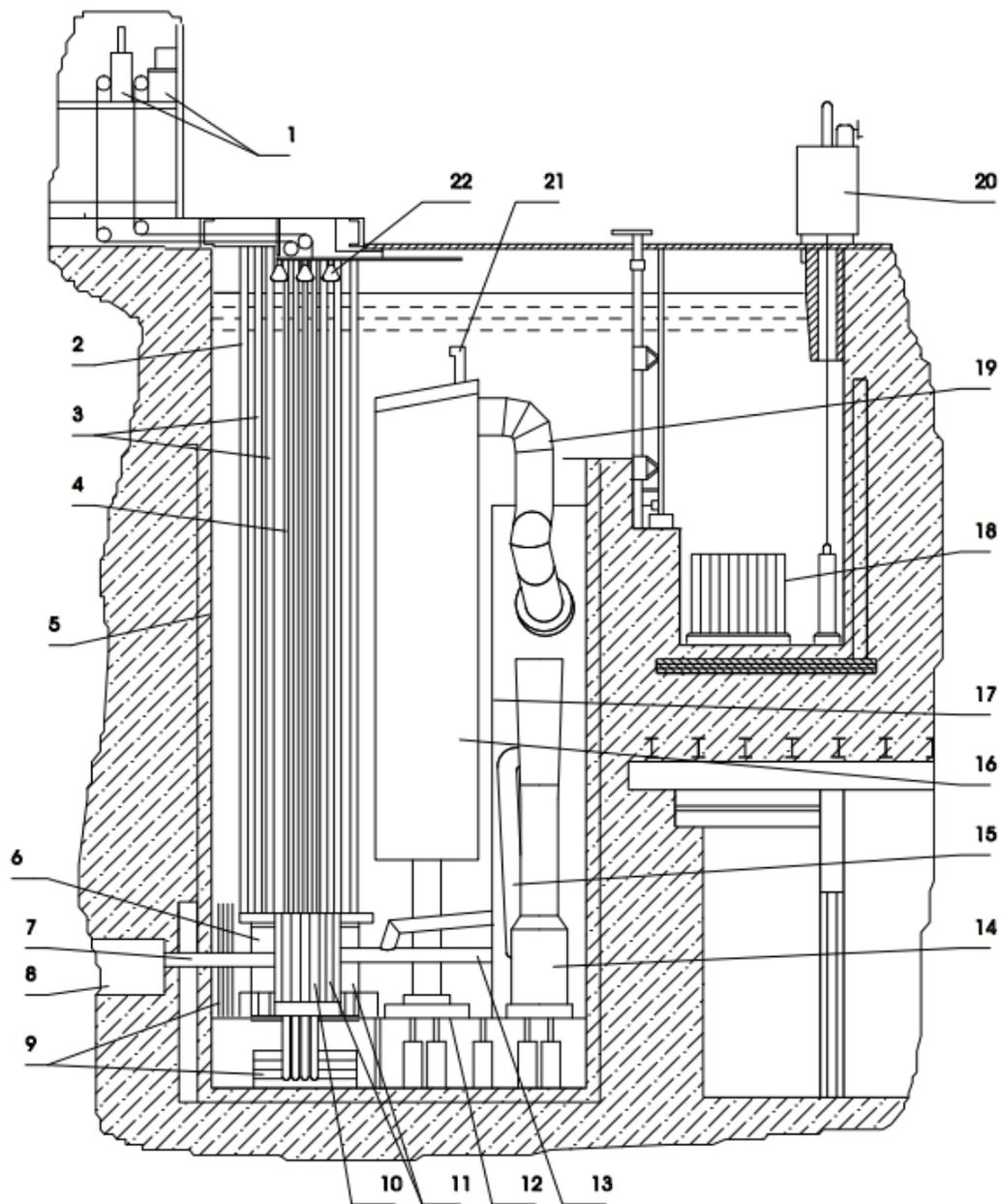
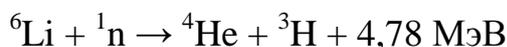


Рисунок 1.4 – Продольный разрез реактора: 1 - приводы стержней СУЗ; 2 - каналы блоков детектирования СУЗ; 3 - экспериментальные каналы (ЭК); 4 - каналы со стержнями СУЗ; 5 - бак реактора; 6 - корпус реактора; 7 - горизонтальный экспериментальный канал (ГЭК); 8 - шибер горизонтального канала; 9 - стальные экраны; 10 - тепловыделяющая сборка; 11 - бериллиевый отражатель; 12 - промежуточное (разделительное) дно; 13 - канал с источником ультрахолодных нейтронов; 14 -эжектор; 15 - трубопровод напорный; 16 - емкость задерживающая; 17 - вертикальная перегородка; 18 - ячейки хранилища отработанных ТВС; 19 - трубопровод всасывающий; 20 - контейнер транспортный; 21 - воздушник; 22 - душирующее устройство.

## 1.3 Изотопы нейтронно-захватной терапии

### 1.3.1 Изотоп ${}^6\text{Li}$

Дозообразующая реакция  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  имеет вид:



Сечение реакции  $\sigma_{\text{Li}} = 945$  барн. Суммарная энергия продуктов реакции составляет  $E_{\text{N}} = 4780$  кэВ, ( $E_{\text{N}} = 2730$  кэВ,  $E^3_{\text{H}} = 2050$  кэВ), т.е. более чем в два раза превосходит энергию продуктов реакции  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma){}^7\text{Li}$ .  $\alpha$  – частицы ( ${}^4\text{He}$ ), отличающейся высокой ЛПЭ и величиной пробега в ткани порядка 7 мкм [12], сопоставимой с размером клеточного ядра. Длина пробега трития около 1-2 мкм [13].

Сечение  $(n, \alpha)$  – реакции природного лития, содержащего 7,5% составляет всего 71 барн. Поэтому природный литий, как и природный бор, обогащают по изотопу  ${}^6\text{Li}$  до 90%. Ядерные характеристики  ${}^6\text{Li}$  с точки зрения нейтрон-захватной терапии несколько превосходят  ${}^{10}\text{B}$  [14]. Литий в незначительных количествах присутствует в живых организмах, но, по-видимому, не выполняет никаких биологических функций. В организме среднего человека (масса 70 кг) содержится около 0,7 мг лития. Токсичная доза 90-200 мг [15], то есть 1,29-2,82 мг/кг.

### 1.3.2 Изотоп ${}^{10}\text{B}$

Дозообразующую реакцию  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma){}^7\text{Li}$  можно представить в виде:



Содержание  ${}^{10}\text{B}$  в естественной смеси изотопов бора составляет 19,6%. Для НЗТ используют препараты с высокими обогащениями по  ${}^{10}\text{B}$ . Сечение этой реакции для тепловых нейтронов равно 3870 барн на изотопе  ${}^{10}\text{B}$  и 750 барн на естественной смеси изотопов бора. Энергия  $\alpha$ - частицы  $E_{\alpha} = 1470$  кэВ, а

нуклида  $E_{Li}^7 = 840$  кэВ. Частицы разлетаются в противоположных направлениях, и их суммарный пробег в биологической ткани не превышает 12 мкм. Пространственное распределение этой компоненты поглощенной дозы нейтронов практически совпадает с полем медленных нейтронов в объекте [16].

И более того, значительная часть треков тяжелых заряженных частиц из этой реакции почти укладываются в размере биологической клетки. Все реакции сопровождаются также фотонным излучением с энергией  $E_\gamma = 477,6$  кэВ. Вклад этого излучения в поглощенную дозу нейтронов пренебрежимо мал. Однако наличие этого фотонного излучения играет существенную позитивную роль для дистанционной дозиметрии нейтронов при НЗТ. При естественном содержании бора в биологической ткани вклад этой реакции в поглощенную дозу невелик. При внутримышечном введении BSH-препаратов с обогащенным бором может быть достигнута концентрация в опухоли  $^{10}\text{B}$  до 30-35 ppm [17].

### 1.3.3 Изотоп $^{157}\text{Gd}$

Реакцию  $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)^{158}\text{Gd}$  можно представить в следующем виде:



Сечение радиационного захвата тепловых нейтронов в этой реакции составляет 248000 барн, а на естественной смеси изотопов 46600 барн. Содержание  $^{157}\text{Gd}$  в естественной смеси составляет 15,7%. Энергия связи нейтрона в ядре гадолиния составляет 7937 кэВ. Это полная энергия, выделяющаяся в этой реакции. Основным продуктом реакции является жесткое фотонное излучение в неразрушаемой (из-за высокой плотности уровней) части спектра, сосредоточенной в основном в энергетическом диапазоне, от 2 до 3 МэВ.

Гадолиний в качестве дозообразующего препарата для НЗТ можно было бы вообще не рассматривать. Но, к сожалению, это направление имеет немало

сторонников. Как ни странно, но 4-7 сентября в 1966 г. в Цюрихе на седьмом Международном симпозиуме по нейтронно-захватной терапии опухолей работала целая самостоятельная секция приверженцев гадолиниевой терапии. Существуют он и в настоящее время [18,19].

По существу нейтронно-гадолиниевая терапия является терапией фотонной. При этом фотоны производятся при помощи нейтронов атомного реактора. Эта фотонная терапия является исключительно дорогостоящей и травматичной в радиационном отношении, поскольку в области облучаемой опухоли поглощается лишь малая часть энергии фотонов. Она не выдерживает никакого сравнения с доступными хорошо известными и широко применяемыми методами фотонной терапии, в том числе и фотонно-гадолиниевой с применением гадолинийсодержащих препаратов. Этот пример заслуживает внимания только потому, что он характеризует общее состояние дел в НЗТ.

\* \* \*

Таким образом, в результате проведенного литературного обзора рассмотрены теоретические основы нейтрон-захватной терапии, источники нейтронов, применяемые изотопы (литий, бор, гадолиний), а так же реакции взаимодействия данных изотопов с нейтронами.

## ГЛАВА 2 Практическая часть

### 2.1 Описание процесса проведения НЗТ

На первом этапе нейтрон-захватной терапии онкологических заболеваний в пораженный орган или ткань человека вводят медицинский препарат, который содержит изотоп с высоким сечением поглощения нейтронов. Например, в случае бора это такие препараты как БФА и BSH, в случае гадолиния это ДТРА. В результате чего изотоп с большой концентрацией скапливается только в раковых клетках и обладает высокой способностью поглощать нейтроны.

Далее идет облучение пораженного органа или ткани нейтронами (тепловыми) ядерного реактора. В результате поглощения нейтрона изотопом происходит ядерная реакция с большим выделением энергии (излучением) в клетке. Энергия выделяется в виде кинетической энергии вторичных частиц, которые летят сквозь ткань и взаимодействуют с электронами окружающих атомов, передавая им часть энергии. Чаще всего это приводит к тому, что электрон вырывается из своего места, и мы получаем ион. Т.е. энергия тратится на ионизацию среды. Это может быть ионизация непосредственно биологических структур, так и ионизация воды. Все это приводит к полному или частичному разрушению клетки. Излучение выделяется только в пределах одной отдельно взятой клетки, т.к. пробег вторичных частиц в результате ядерной реакции не превышает размера клетки, то окружающие здоровые клетки и ткани не повреждаются.

Пример схемы установки нейтрон-захватной терапии представлен на рисунке 2.1 [20].

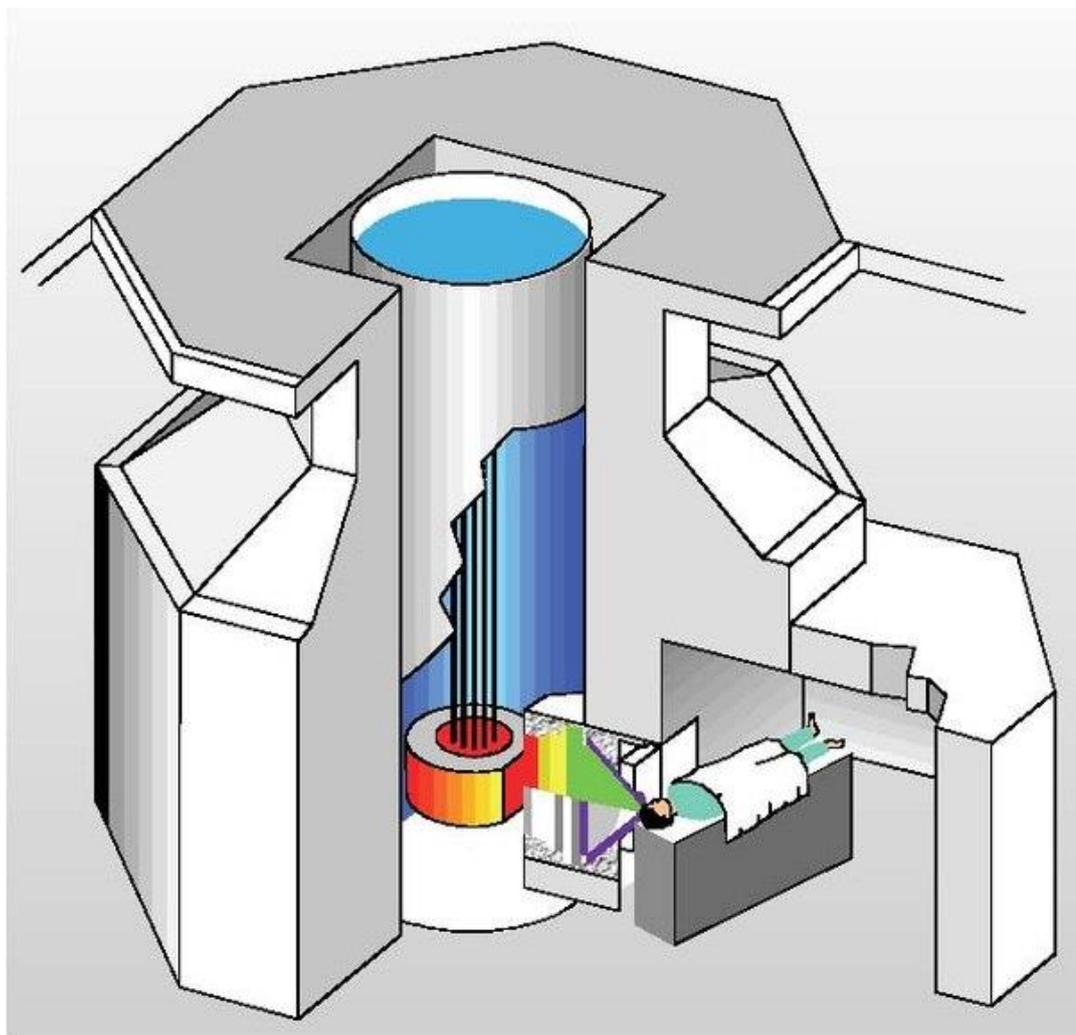


Рисунок 2.1 – Схема установки нейтрон-захватной терапии

Использование нейтроновода позволяет получить чистый пучок нейтронов с очень малым вкладом быстрых нейтронов и фотонного излучения.

В случае использования ультрахолодных нейтронов, в установке присутствует низкотемпературный конвертер.

Нейтроны из активной зоны реактора по горизонтальному каналу попадают в низкотемпературный конвертер, который заполнен жидким сверхтекучим гелием. Конвертер выполнен таким образом, что обеспечивает полное отражение УХН на границе. В результате рассеяния на ядрах сверхтекучего гелия нейтрон теряет практически всю энергию. После замедления в низкотемпературном конвертере ультрахолодные нейтроны через тонкое прозрачное окно с длиной когерентного рассеяния меньше нуля подаются в вакуумный нейтроновод, по которому транспортируются в

экспериментальный зал, где проводят эксперименты или медицинские процедуры по НЗТ

Распространение УХН по нейтроноводу аналогично течению разреженного газа по трубам и характеризуется длиной диффузии. Некоторая часть УХН теряется как в соударениях с ядрами атомов остаточного газа, так и в соударениях со стенками нейтроновода. Для электрополированных нейтроноводов диаметром  $\sim 10$  см экспериментальные значения длины диффузии достигают  $\approx 10$  м.

Нейтроны с энергией  $E < E_{гр}$  при движении внутри нейтроновода будут многократно отражаться от стенок, а траектория движения нейтронов будет следовать изгибам нейтроновода. Даже поворот на  $180^\circ$  не увеличивает «сопротивление» нейтроновода. Нейтроны с энергией  $E > E_{гр}$  выйдут из нейтроновода либо сразу за конвертором после первого же соударения со стенкой (если условия полного внешнего отражения не будут выполнены), либо в месте изгиба нейтроновода после нескольких отражений их на прямолинейных участках. Вероятность зеркального отражения УХН составляет порядка 0,8-0,9. Наиболее эффективно отражает ультрахолодные нейтроны полированный сапфир—измеренная вероятность зеркального отражения в типичных экспериментальных условиях достигает 99,8% [21].

Концевая часть нейтроновода выполнена в виде гибкого нейтроновода-катетера сильфонного типа. По катетеру ультрахолодные нейтроны доставляют непосредственно к пораженному органу по пищеводу, ротовой полости, бронхам, мочевыводящим путям, прямой кишке или другим путем.

## **2.1 Методика проведения расчетов**

Первым делом нужно посчитать количество произошедших ядерных реакций за определенную продолжительность облучения.

Количество ядерных реакций за время облучения при нейтронной терапии можно оценить с помощью выражения:

$$N_T \approx N \cdot \varphi \cdot t \cdot \sigma \quad (2.1)$$

где  $N$  – количество ядер изотопа;

$\varphi$  - плотность потока тепловых нейтронов в месте расположения опухоли,  $\text{н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ;

$t$  - продолжительность облучения, с;

$\sigma$  - сечение захвата тепловых нейтронов, барн;

Как следует из выражения величины  $N_T$ , количество ядерных реакций в единицу времени зависит не только от величины нейтронного потока, но сечения захвата нейтронов.

Терапевтический эффект в результате захвата нейтронов можно оценить и исходя из мощности поглощенной дозы в опухоли  $P$ , [Гр/с] [22]:

$$P = \varphi \cdot (C_{\text{опух}} \cdot N_A / M) \cdot \sigma \cdot E \cdot K \quad (2.2)$$

где  $\varphi$  - плотность потока тепловых нейтронов,  $\text{н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ;

$C_{\text{опух}}$  - концентрация в опухоли,  $\text{мкг}/\text{г}$ ;

$N_A$  - число Авогадро,  $\text{моль}^{-1}$ ;

$M$  - молекулярная масса химического элемента,  $\text{г}/\text{моль}$ ;

$\sigma$  - сечение захвата теплового нейтрона,  $\text{см}^2$ ;

$E$  - энергия от продуктов реакции, МэВ;

$K$  - коэффициент согласования размерностей,  $\text{сГр} \cdot \text{г}/\text{МэВ}$ ;

Исходя из расчета мощность поглощенной дозы можно будет оценить время экспозиции, обеспечивающей необходимый терапевтический эффект. Считается, что доза 5 Гр приближается к оптимальному уровню радиационного воздействия на злокачественную опухоль.

В случаи, когда вместо тепловых нейтронов используются ультрахолодные нейтроны, для начала нужно посчитать граничную энергию полного отражения нейтрона от поверхности при любых углах падения.

Нейтроны со скоростью  $V < V_{\text{гр}}$  и соответственно с энергией  $E < E_{\text{гр}}$  (граничные значения скорости и энергии для материала, из которого изготовлен нейтронпровод) при движении их внутри нейтронвода будут многократно отражаться от его стенок, а траектория движения нейтронов будет следовать

изгибам нейтроновода. Нейтроны со скоростью  $V > V_{гр}$  выйдут из нейтроновода либо сразу за конвертором после первого же соударения со стенкой, либо в месте изгиба нейтроновода после нескольких отражений их на прямолинейных участках. Поэтому нужно произвести расчет  $E_{гр}$ .

Граничная энергия полного отражения нейтрона от поверхности при любых углах падения определяется выражением:

$$E_{гр} = \frac{mv_{кр}^2}{2} = \frac{2\pi\hbar}{m} \rho b \quad (2.3)$$

где  $\rho$  – плотность ядер, кг/м<sup>3</sup>;

$b$  – длина когерентного рассеяния, фм;

$m$  – масса нейтрона, кг;

( $\pm$ ) - для спина нейтрона с параллельным и антипараллельным направлениям  $B$ ;

$\hbar$  – постоянная планка, эВ·с;

При  $b > 0$  нейтрон, попадающий из вакуума в среду, встречает положительный барьер высотой  $U$ . Для большинства ядер (Be, C, Mg, Fe, Cu, Zn, Pb и т.д.)  $b > 0$  и лишь для некоторых типов ядер (Li, Mn, Ti, V)  $b < 0$ .

Почти для всех веществ  $E_{гр} \sim 10^{-7}$  эВ.

Таблица 2.1 Значения  $E_{гр}$  и критических скоростей для различных веществ

Вещество	$E_{гр}$ ( $10^{-7}$ эВ)	$V_{гр}$ , м/с	Вещество	$E_{гр}$ ( $10^{-7}$ эВ)	$V_{гр}$ , м/с
H <sub>2</sub> O	-0,146	-	Ti	-0,5	-
Полиэтилен	-0,07	-	Mn	-0,68	-
Be	2,5	6,9	Fe	3,5	8,2
C(графит)	1,75	5,83	Нерж. Сталь	1,82	6,05
Mg	0,595	3,37	Cu	1,72	5,7
Al	0,541	3,22	Co	1,74	5,76

Таблица 2.2 Значения длин когерентного рассеяния некоторых веществ [23]

Z	Элемент	$b_{ког}$ , фм
1	H	-3,7409
29	Cu	7,718
28	Ni	10,3

Продолжение таблицы 2.2

30	Zn	5,68
13	Al	3,449

Далее нужно произвести расчет значений сечения захвата ультрахолодных нейтронов.

Сечение захвата ультрахолодных нейтронов для 1/v-поглотителя  $\sigma_a^{yxn}$  можно получить, используя значение сечения для нейтронов произвольной скорости  $\sigma_a(E_0=kT)$  с помощью следующего выражения [11]:

$$\sigma_a^{yxn} = \sigma_a(E_0=kT) \cdot (v_{kT}/v_{yxn}) \quad (2.4)$$

где  $v_{kT}$  - скорость нейтронов при температуре T, м/с;

$v_{yxn}$  - скорость ультрахолодного нейтрона, м/с;

k- константа Больцмана, Дж/К;

Значение сечения для нейтронов произвольной скорости определяем следующим образом:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\alpha 0} v_0}{v} = \sigma_{\alpha 0} \sqrt{\frac{E_0}{E}} \quad (2.5)$$

где  $\sigma_{\alpha 0}=4010$  барн – сечение (n, $\alpha$ )- реакции при энергии нейтронов  $E_0=0,025$  эВ, которой соответствует скорость нейтронов  $v_0= 2200$  м/сек,  $v$  и  $E$ - скорость и энергия нейтронов, которым соответствует сечение (n, $\alpha$ )-реакции  $\sigma_a$ .

Формула количества ядерных реакций в единицу времени при нейтронной терапии для ультрахолодных нейтронов примет вид:

$$N_{yxn} \approx N \cdot \varphi_{yxn} \cdot t \cdot \sigma_a^{yxn} \quad (2.6)$$

где  $\varphi_{yxn}$  - плотность потока ультрахолодных нейтронов в месте расположения опухоли, н/(см<sup>2</sup>·с);

$\sigma_a^{yxn}$  - сечение захвата ультрахолодных нейтронов;

Мощности поглощенной дозы в опухоли при ультрахолодных нейтронах:

$$P = \varphi_{yxn} \cdot (C_{опух} \cdot N_A/M) \cdot \sigma_a^{yxn} \cdot E \cdot K \quad (2.7)$$

## 2.2 Результаты расчетов и их обсуждение

В качестве первичного источника нейтронов выбран экспериментальный исследовательский реактор ИР-8 тепловой мощностью 8 МэВ. Максимальный нейтронный поток в активной зоне реактора достигает значения  $2 \cdot 10^{14}$  н/(см<sup>2</sup>·с).

В таблице 2.3 приведены характеристики тепловых и ультрахолодных нейтронов.

Таблица 2.3 – Характеристики нейтронов

Нейтроны	Энергия E, эВ	Скорость v, см/с	Ср. длина волны $\lambda$ , см	Средняя температура $T_{\text{ср}}$ , К
Тепловые	$0,5-5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-8}$	300
ультрахолодные	$10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^{-6}$	$10^{-3}$

Расчеты для разных изотопов произведены при одинаковой концентрации, равной 30 мкг/г.

Табличные значения сечения захвата тепловых нейтронов:

$$\sigma_{\text{Li}} = 945 \text{ барн};$$

$$\sigma_{\text{B}} = 3840 \text{ барн};$$

$$\sigma_{\text{Gd}} = 248000 \text{ барн}.$$

Количество ядерных реакций в единицу времени рассчитаем по формуле 2.1.

Для начала нужно от концентрации, равной 30 мкг/г, перейти к количеству ядер изотопа.

Количество ядер рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{m \cdot N_a}{M};$$

$$N_{\text{Li}} = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{6} = 3 \cdot 10^{18}$$

$$N_B = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{10} = 1,8 \cdot 10^{18}$$

$$N_{Gd} = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{157} = 0,115 \cdot 10^{18}$$

Теперь произведем расчет количества ядерных реакций за 1 час облучения для лития:

$$N_T = 3 \cdot 10^{18} \cdot 10^9 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 945 \cdot 10^{-24} = 1,02 \cdot 10^{10}$$

Для бора:

$$N_T = 1,8 \cdot 10^{18} \cdot 10^9 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 3840 \cdot 10^{-24} = 2,5 \cdot 10^{10}$$

Для гадолиния:

$$N_T = 0,115 \cdot 10^{18} \cdot 10^9 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 248000 \cdot 10^{-24} = 10,3 \cdot 10^{10}$$

На примере лития, за 1 час облучения в каждом миллилитре ее объема в потоке нейтронов  $10^9$  н/(см<sup>2</sup>·с) рождается более  $10^{10}$  α-частиц и <sup>3</sup>Н. К примеру в 1 мл меланомы содержится около  $10^9$  раковых клеток, то на каждую клетку меланомы приходится около 10-ти пар α-частиц и ядер <sup>3</sup>Н. Для уничтожения раковой клетки достаточно лишь нескольких α-частиц [25].

Считается, что доза 5 Гр приближается к оптимальному уровню радиационного воздействия на злокачественную опухоль.

Глубина проникновения α-частиц в биологической ткани варьируется от 30 до 80 мкм, что соответствует нескольким диаметрам клетки. Плотность ионизации достигает – 100 кэВ/мкм, так что расстояние между двумя последовательными актами взаимодействия сравнимо с расстоянием между двумя нитями спирали ДНК. Поэтому вероятность обеспечить двойной разрыв спирали с помощью одной α – частицы достаточно высока, что автоматически означает высокую терапевтическую эффективность.

Мощность поглощенной дозы в опухоли, то есть оценка терапевтического эффекта, рассчитывается по формуле 2.2.

Для лития:

$$P_{Li} = \frac{10^9 \cdot 30 \cdot 9,45 \cdot 10^{-22} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot 4,78}{6} = 2,17 \cdot 10^{-3} \text{ Гр/сек} =$$

$$= 0,131 \text{ Гр/мин}$$

Таким образом, потребуется порядка 38 минут, для достижения дозы 5 Гр в случае использования лития.

На рисунке 2.2 приведена зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения.

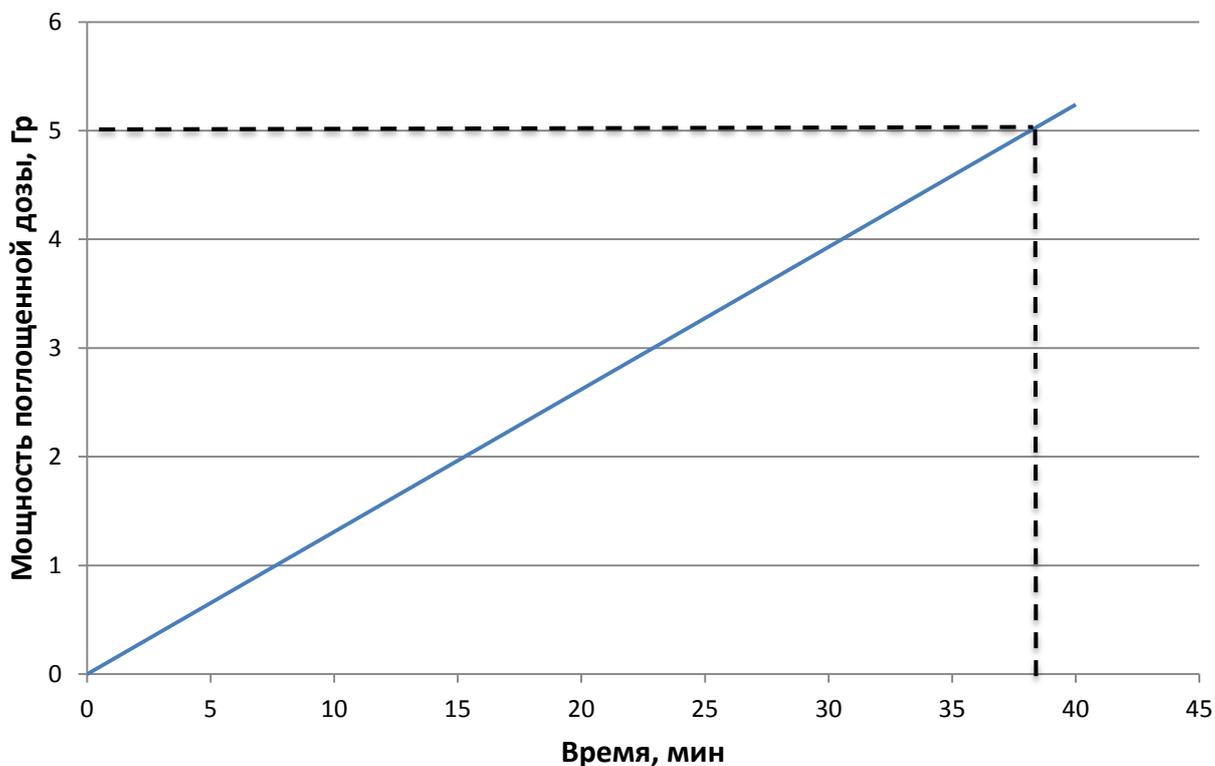


Рисунок 2.2 – Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для лития

Для бора:

$$P_B = \frac{10^9 \cdot 30 \cdot 3,84 \cdot 10^{-21} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot 2,3}{10} = 2,55 \cdot 10^{-3} \text{ Гр/сек} = 0,153 \text{ Гр/мин}$$

В случае использования бора, потребуется порядка 33 минут, для достижения дозы 5 Гр.

Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для В представлена графике 2.3.

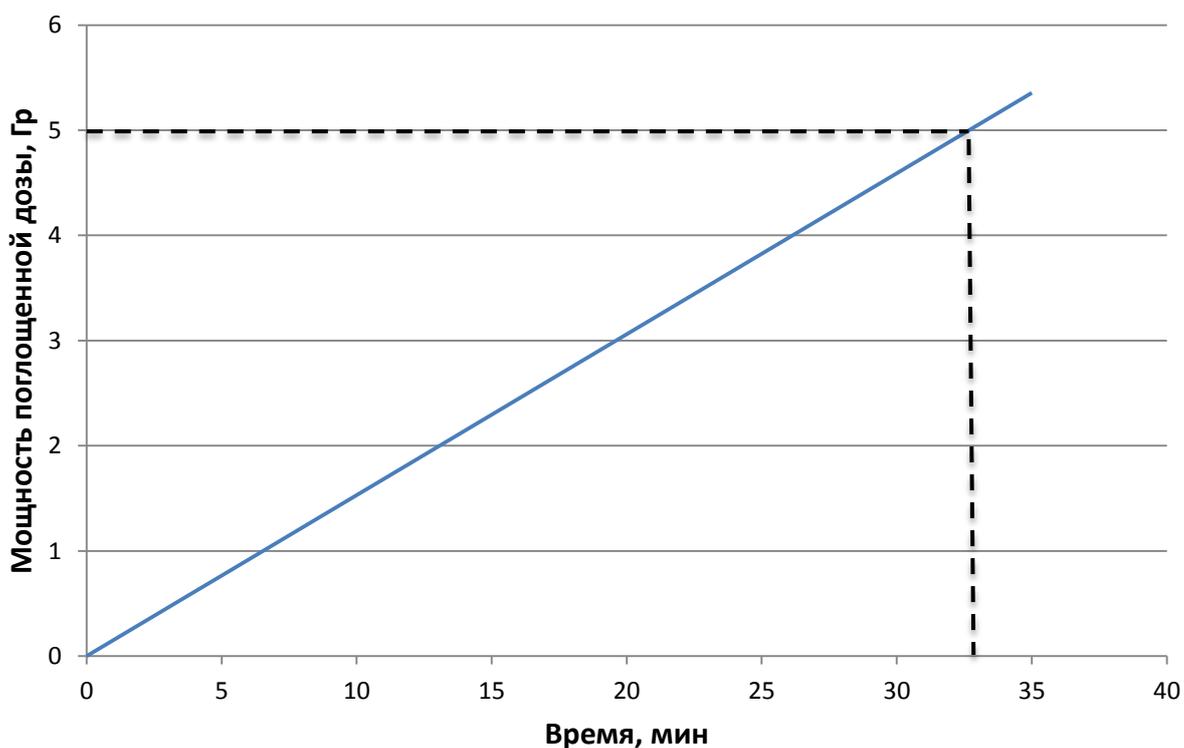


Рисунок 2.3 – Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для бора

Для гадолиния:

$$P_{Gd} = \frac{10^9 \cdot 30 \cdot 2,48 \cdot 10^{-19} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot 7,9}{157} = 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ Гр/сек} =$$

$$= 2,16 \text{ Гр/мин}$$

В случае использования гадолиния, потребуется порядка 2-3 минут, для достижения дозы 5 Гр.

Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для Gd представлена графике 2.4.

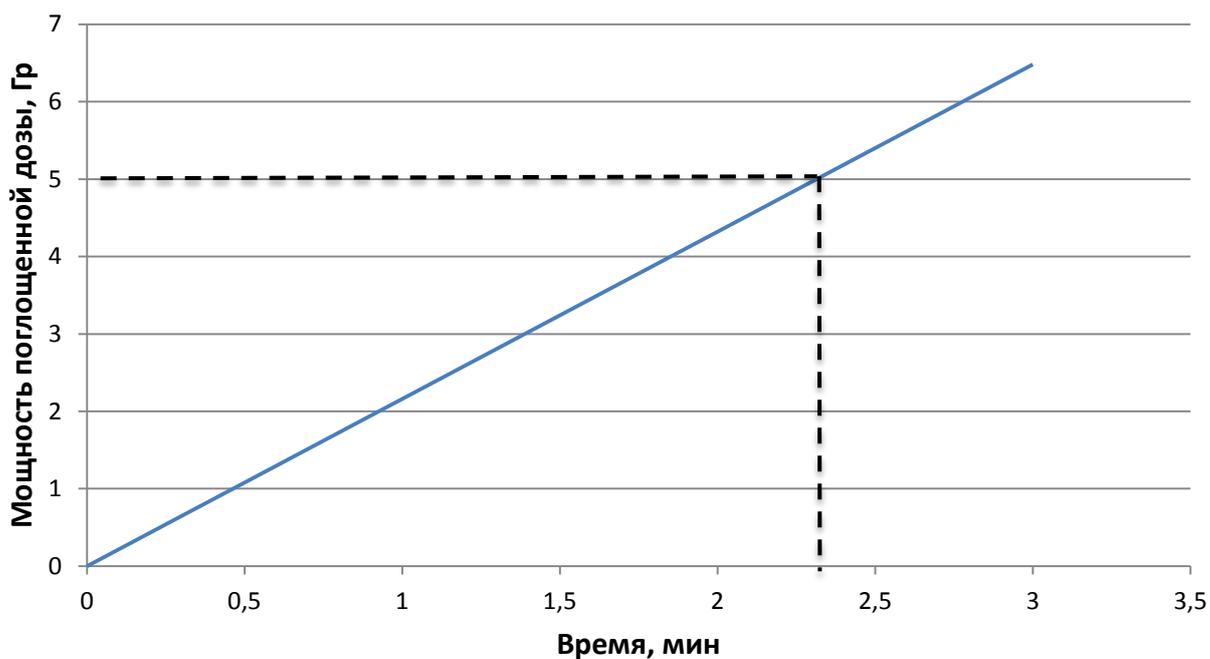


Рисунок 2.4 – Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для гадолиния

Для большей наглядности и сравнения, на рисунке 2.5 представлены сразу все три элемента.

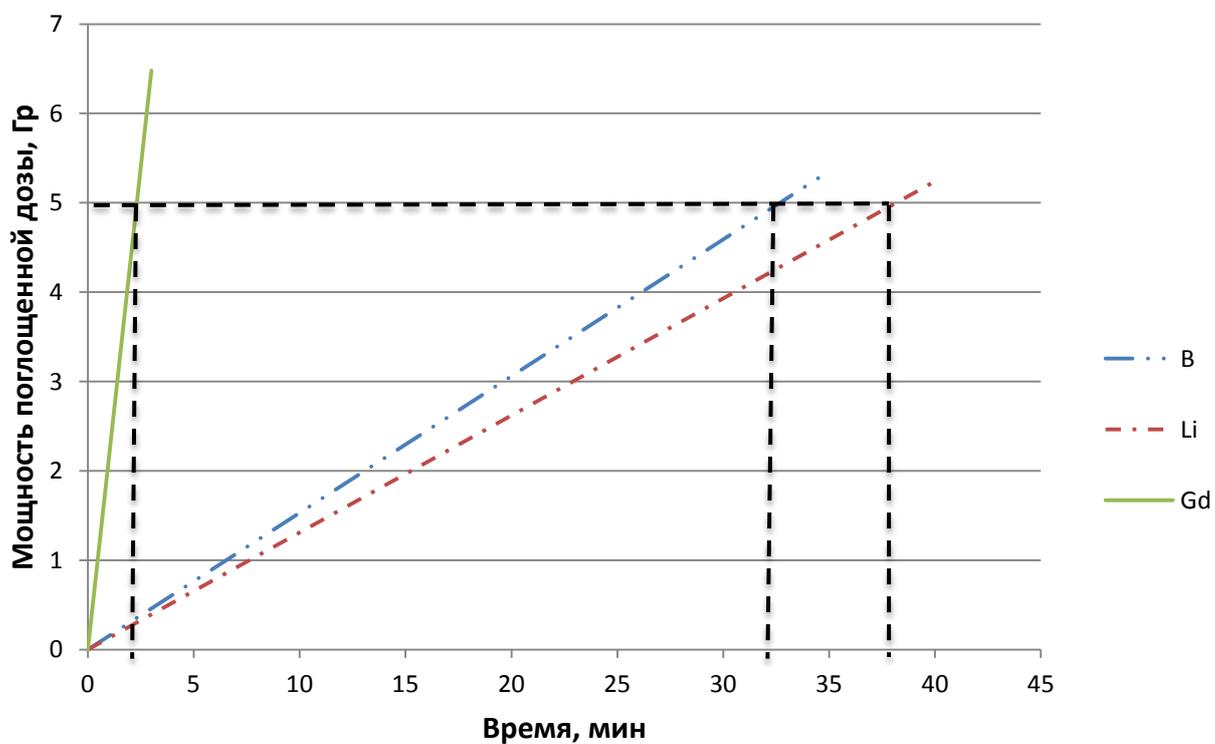


График 2.5 Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для бора, лития и гадолиния

Доза, необходимая для уничтожения раковых клеток, зависит от количества жизнеспособных или клоногенных клеток. Так, для  $10^{12}$  клеток необходима доза 60 Гр, для  $10^8$  клеток - 40 Гр, для  $10^4$  клеток - 20 Гр и для 100 клеток - доза 10 Гр [26]. Однако следует иметь в виду, что допустимая доза для костного мозга составляет 1-5 Гр, для ЖКТ - 1-5 Гр, для сосудистой системы - 10-20 Гр и для всего тела в целом - 2 Гр. Летальная доза для субклинических опухолевых образований из  $10^4$  клеток - 20 Гр. Для ограничения системной дозы на тело до 2 Гр необходимо обеспечить отношение распределения дозовой нагрузки опухоль/ткани не менее 10:1. Для 100 раковых клеток, циркулирующих в крови, необходимо 10 Гр и, следовательно, нужно обеспечить отношение 5:1.

Далее произведем расчет, когда вместо тепловых нейтронов используются ультрахолодные нейтроны.

Ультрахолодные нейтроны (УХН) имеют скорость  $<10$  м/с и длину волны от нескольких сот до тысячи ангстрем. Одной из особенностей УХН является их способность испытывать полное отражение от поверхности конденсированного вещества при любых углах падения. На существование явления отражения нейтронов очень низких энергий и на вытекающую из него возможность длительного хранения нейтронов в специальных емкостях впервые было указано в работе [27]. Явление полного отражения УХН, возможность длительного удержания в замкнутых объемах и транспортировки по нейтроноводам были продемонстрировано в многочисленных экспериментах [28].

Время хранения УХН в специальных емкостях определяется временем жизни свободного нейтрона до  $\beta$ -распада и потерями в результате неупругого рассеяния или захвата при соударениях со стенками объема хранения.

Граничная энергия полного отражения нейтрона от поверхности при любых углах падения определяется выражением 2.3:

$$E_{гр} = \frac{mv_{кр}^2}{2} = \frac{2\pi h}{m} \rho b \quad (2.3)$$

Произведем расчет, принимая медь в качестве материала стенок нейтроновода.

Значение критической скорости для меди берем из таблицы 2.1, равное 5,7 м/с.

Значение длины когерентного рассеяния для меди из таблицы 2.2, равное 7,718 фм.

В результате чего получаем  $E_{гр} \approx 1,72 \cdot 10^{-7}$  эВ, соответствующее условию  $E < E_{гр}$ .

Значения сечений для ультрахолодных нейтронов получаем, используя формулы 2.4 и 2.5:

$$\sigma_{aLi}^{УХН} = 9,45 \cdot 10^{-22} \cdot \sqrt{\frac{0,025}{293,6 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5}}} \cdot \frac{2200}{8} = 2,58 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2 =$$

$$= 258332 \text{ барн}$$

$$\sigma_{aB}^{УХН} = 4,01 \cdot 10^{-21} \cdot \sqrt{\frac{0,025}{293,6 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5}}} \cdot \frac{2200}{8} = 1,09 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2 =$$

$$= 1096203 \text{ барн}$$

$$\sigma_{aGd}^{УХН} = 2,48 \cdot 10^{-19} \cdot \sqrt{\frac{0,025}{293,6 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5}}} \cdot \frac{2200}{8} = 6,78 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2 =$$

$$= 67795100 \text{ барн}$$

Для наглядности, в таблице 2.4, приведем сравнение значений сечений захвата тепловых и ультрахолодных нейтронов.

Таблица 2.4 – Сечение захвата тепловых и УХН

Нейтроны	Li	B	Gd
Тепловые	945	3840	248000
УХН	258332	1096203	67795100

Теперь, зная сечения захвата ультрахолодных нейтронов, произведем расчет количества ядерных реакций за 1 час облучения УХН для лития по формуле 2.6:

$$N_{\text{УХН}} = 3 \cdot 10^{18} \cdot 10^6 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 258332 \cdot 10^{-24} = 2,79 \cdot 10^9$$

Для бора:

$$N_{\text{УХН}} = 1,8 \cdot 10^{18} \cdot 10^6 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 1096203 \cdot 10^{-24} = 7,1 \cdot 10^9$$

Для гадолиния:

$$N_{\text{УХН}} = 0,115 \cdot 10^{18} \cdot 10^6 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 67795100 \cdot 10^{-24} = 28,1 \cdot 10^9$$

Таким образом, можно сделать вывод, что на каждую раковую клетку приходится по несколько пар вторичных частиц, что так же является эффективным.

Мощность поглощенной дозы в опухоли, при использовании УХН, можно оценить с помощью формулы 2.7.

$$P_{\text{Li}} = \frac{10^6 \cdot 30 \cdot 2,58 \cdot 10^{-19} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot 4,78}{6} = 5,95 \cdot 10^{-4} \text{ Гр/сек} =$$

$$= 0,0357 \text{ Гр/мин}$$

В случае с УХН, потребуется порядка 140 минут, для достижения дозы 5 Гр при использовании лития.

На рисунке 2.6 приведена зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения.

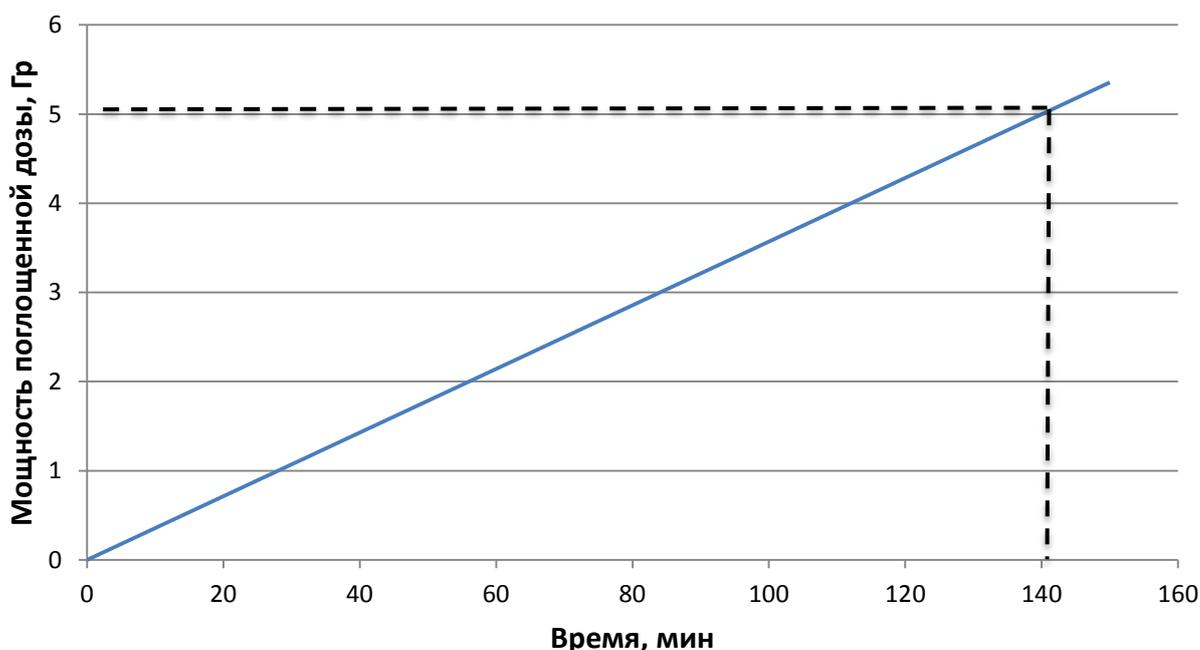


Рисунок 2.6 – Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для лития

$$P_B = \frac{10^6 \cdot 30 \cdot 1,09 \cdot 10^{-18} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot 2,3}{10} = 7,28 \cdot 10^{-4} \text{ Гр/сек} =$$

$$= 0,0437 \text{ Гр/мин}$$

В случае бора, нужно порядка 114 минут, что бы значение дозы было 5 Гр.

На рисунке 2.7 приведена зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для бора.

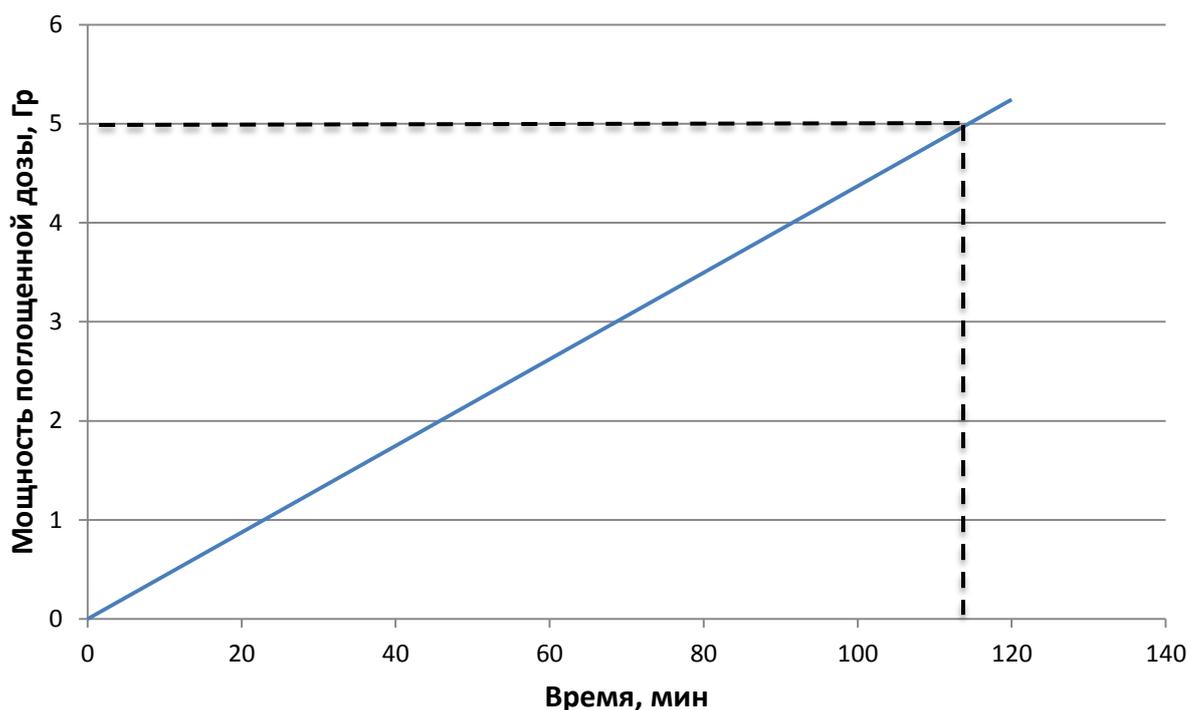


Рисунок 2.7 – Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для бора

$$P_{Gd} = \frac{10^6 \cdot 30 \cdot 6,78 \cdot 10^{-17} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot 7,9}{157} = 9,85 \cdot 10^{-3} \text{ Гр/сек} =$$

$$= 0,591 \text{ Гр/мин}$$

В случае использования гадолиния и УХН, потребуется порядка 8 минут, для достижения дозы 5 Гр.

Зависимость  $P(t)$  для Gd изображена на рисунке 2.8.

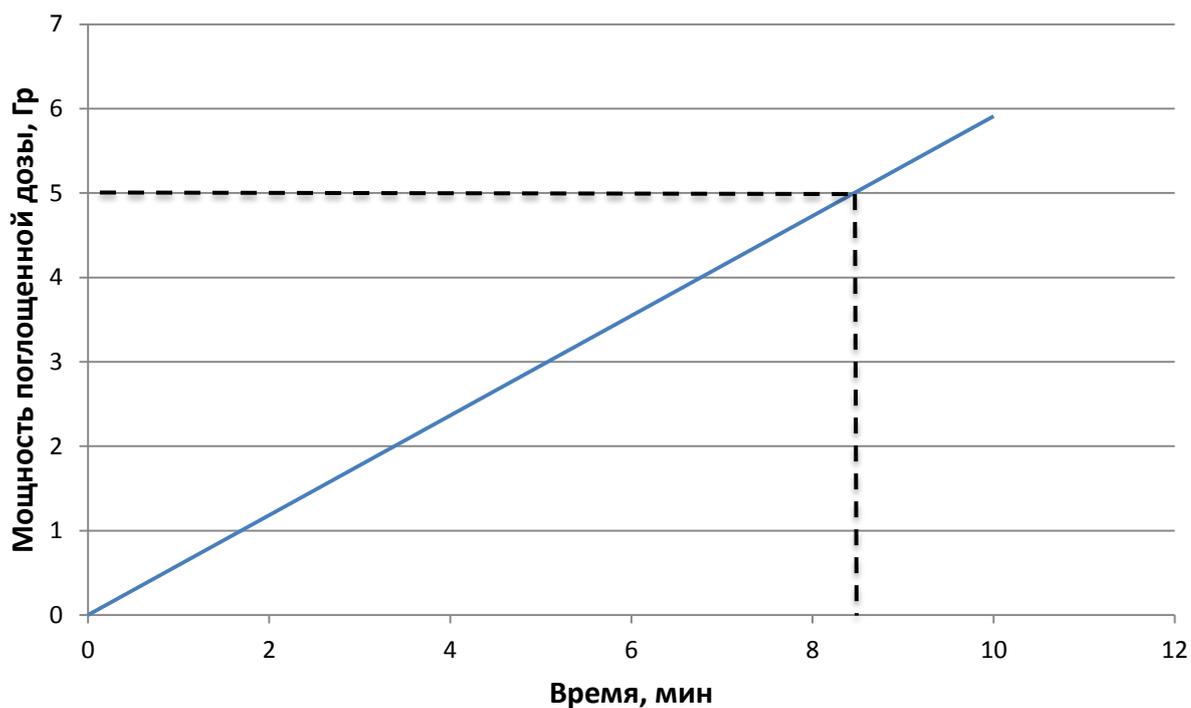


Рисунок 2.8 – Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для гадолиния

Так же как и в случае с тепловыми нейтронами, на рисунке 2.9 приведена зависимость  $P(t)$  сразу трех элементов.

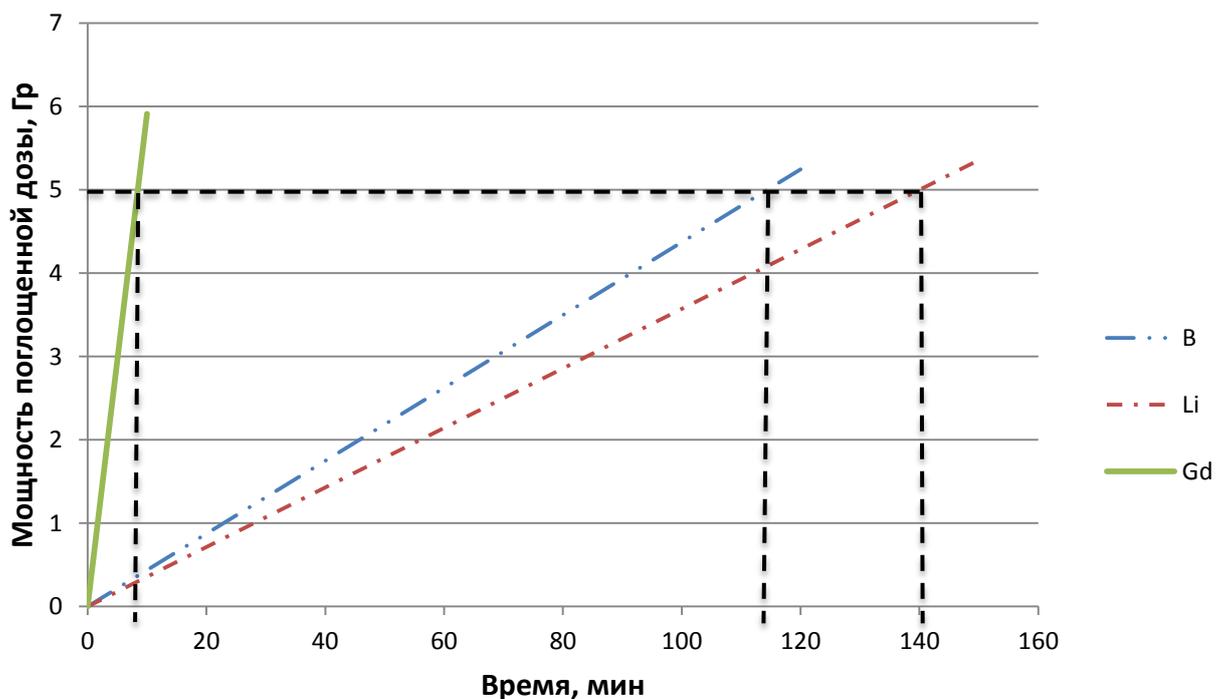


Рисунок 2.9 – Зависимость мощности поглощенной дозы от времени облучения для бора, лития и гадолиния

Таким образом, использование пучков ультрахолодных нейтронов с плотностью потока  $10^6$  н/(см<sup>2</sup>·с) и экспозицией около 2 часов обеспечивает необходимый терапевтический эффект при лечении онкологических заболеваний.

Основные результаты проведенных расчетов приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчетов

параметр/изотоп	Li	B	Gd	Li	B	Gd
вид нейтронов	тепловые нейтроны			УХН		
сечение захвата нейтронов (G), барн	945	3840	248000	258332	1096203	67795100
количество ядерных реакций за t (N)	$1,02 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{10}$	$10,3 \cdot 10^{10}$	$2,79 \cdot 10^9$	$7,1 \cdot 10^9$	$28,1 \cdot 10^9$
мощности поглощенной дозы (P), Гр/мин	0,131	0,153	2,16	0,0357	0,0437	0,591

Подводя итог проведенным исследованиям, можно сделать несколько основных выводов об эффективности использования лития, бора и гадолиния для проведения нейтрон – захватной терапии:

Суммарная энергия продуктов реакции Li более чем в два раза превосходит энергию продуктов реакции B.

Наилучшей способностью к захвату нейтронов обладает 157-й изотоп гадолиния, однако ядерная реакция, происходящая при захвате нейтрона, сопровождается сильным радиоактивным излучением. По существу нейтронно-гадолиниевая терапия является терапией фотонной. Эта фотонная терапия

является исключительно дорогостоящей и травматичной в радиационном отношении, поскольку в области облучаемой опухоли поглощается лишь малая часть энергии фотонов.

Ультрахолодные нейтроны имеют скорость  $<10$  м/с, в случае их использования, сечение захвата нейтронов возрастает на несколько порядков. Использование УХН и изогнутой формы нейтропровода, изготовляемого из электрополированных медных или нержавеющей стальных труб диаметров  $\sim 100 - 150$  мм, позволяет отфильтровывать ультрахолодные нейтроны от высокого фона быстрых и тепловых нейтронов реактора.

Количество ядерных реакций за 1 час облучения для всех трех изотопов удовлетворяет условию уничтожения раковой клетки [12], как в случае тепловых нейтронов, так и УХН.

Сравнивая литий и бор в значении мощности поглощенной дозы, с помощью графиков приведенных на рисунках 2.5 и 2.9, можно сделать вывод, что литий совсем немного уступает бору, вследствие чего время облучения тепловыми нейтронами увеличится на несколько минут. В случае УХН, время облучения с 114 минут увеличится до 140 минут.

Исходя из мощности поглощенной дозы в опухоли, можно оценить терапевтический эффект в результате захвата нейтронов. Наибольшую мощность поглощенной дозы в опухоли имеет гадолиний, но это тяжёлый элемент. Его токсичность сопоставима с токсичностью ртути и мышьяка. Для введения в организм его химическая токсичность должна быть устранена, и он может быть использован только в очень малых концентрациях. Требуемая концентрация гадолиния имеет определённый объем, и зачастую его просто невозможно ввести в опухоль, он там просто не поместится.

Таким образом, на перспективность и эффективность использования того или иного изотопа, и в частности лития, при нейтрон-захватной терапии, помимо ядерных свойств существенное влияние оказывают экологические, биологические и экономические аспекты, что позволяет утверждать, что у каждого из рассмотренных изотопов есть свои «плюсы» и «минусы».

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

Работа направлена на исследование перспективности использования изотопа лития в нейтронно-захватной терапии.

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не только масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает трудно, но и коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческого потенциала разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, чтобы удовлетворить потребителя, каков бюджет научного проекта, сколько времени потребуется для выхода на рынок.

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации. Для достижения описанной цели необходимо сформировать концепцию проекта, организовать работы по научно-исследовательскому проекту, определить возможные альтернативы проведения научных исследований. Необходимо провести планирование научно-исследовательских

работ, оценку коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Выполнение научных исследований затрагиваемой области должно строиться на основе подходов и принципов управления проектами. В предпроектную стадию входит анализ, направленный на сбор информации, описывающий требования к продукту, который должен произвести научный проект, коммерческий и инновационный потенциал научно-технического исследования. Основными представляемыми моментами являются результаты следующих этапов управления научным проектом:

- инициация проекта;
- планирование проекта;
- исполнение проекта.

Данным этапам должен предшествовать предпроектный анализ, направленный на сбор информации, описывающий требования к продукту или услуге.

### **3.1 Предпроектный анализ**

#### **3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Конечным продуктом данного научного исследования является анализ перспективности использования лития для нейтронно-захватной терапии онкологических заболеваний. К сегментам рынка данных исследований можно отнести здравоохранительные и учебные учреждения, физические лица.

### 3.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Данный анализ проведен с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 3.1. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырех конкурентных товаров и разработок. Б – продукт, который является результатом данной работы, Б<sub>к1</sub> и Б<sub>к2</sub> – конкурентные разработки.

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение эффективности	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
2. Экологичность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
3. Безопасность использования	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
4. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность исследований	0,25	4	4	3	1	1	0,75
2. Цена	0,15	4	3	3	0,6	0,45	0,45
3. Финансирование научной разработки	0,1	3	3	3	0,3	0,3	0,3
<b>Итого</b>	1	30	26	23	4,55	3,95	3,45

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 3.1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5

– наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (3.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

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

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

### 3.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ – (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Он проводится в несколько этапов.

В первом этапе описываются сильные и слабые стороны проекта, выявляются возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Соответствия или несоответствия помогут выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. В рамках данного этапа строится интерактивная матрица проекта (таблица 3). Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечаем либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает

слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>          С1. Перспектива использования нового изотопа в нейтронно-захватной терапии.          С2. Безопасность использования для человека.          С3. Экологичность технологии.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>          Сл1. Литературные данные о использовании лития в терапии немногочисленны.          Сл2. Недостаток финансовых средств.          Сл3. Проблемы материального обеспечения.</p>
<p><b>Возможности:</b>          В1. Использование научно-исследовательские достижения ТПУ          В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт          В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>		
<p><b>Угрозы:</b>          У1. Отсутствие спроса на новые технологии          У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства          У3. У руководства НИР проблемы с материально-техническим обеспечением</p>		

Таблица 3.3 – Интерактивная матрица проекта

		Возможности			Угрозы		
		В1	В2	В3	У1	У2	У3
Сильные стороны	С1	+	-	-	-	0	0
	С2	-	+	+	-	-	0
	С3	0	+	-	-	-	0

Продолжение таблицы 3.3

Слабые стороны	Сл1	+	0	+	-	-	0
	Сл2	-	0	-	0	0	+
	Сл3	0	0	-	-	-	0

В рамках третьего этапа составлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 3.4 – Итоговая матрица SWOT – анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>                  С1. Перспектива использования нового изотопа в нейтронно-захватной терапии.                  С2. Безопасность использования для человека.                  С3. Экологичность технологии.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>                  Сл1. Литературные данные о использовании лития в терапии немногочисленны.                  Сл2. Недостаток финансовых средств.                  Сл3. Проблемы материального обеспечения.</p>
<p><b>Возможности:</b>                  В1. Использование в качестве научно-исследовательского достижения ТПУ                  В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт                  В3. Высокая стоимость разработок конкурентов</p>	<p>При использовании инновационной инфраструктуры ТПУ упрощается проведения исследований изотопа лития, с помощью которого могут открыться новые возможности в нейтронно-захватной терапии.                  Для проведения радиационно-прививочной полимеризации применяют широкий спектр различных источников ионизирующего излучения, что возможно при использовании инновационной инфраструктуры ТПУ.                  Появление спроса на новый продукт может быть увеличен за счет технологичности и экологичности продукта.</p>	<p>Малые источники информации по использованию изотопа лития в терапии.                  Если использовать инновационную инфраструктуру ТПУ, то появится возможность избавиться от недостатка финансовых средств.</p>
<p><b>Угрозы:</b>                  У1. Отсутствие спроса на новые технологии                  У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства                  У3. Практическое использование пока ограничено</p>	<p>На сегодняшний день существуют исследования других изотопов в данной области, поэтому может возникнуть проблема вывода исследований в практическую плоскость.</p>	<p>Отсутствие спроса на новые технологии, могут ограничить поступление финансовых средств.</p>

## 3.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

### *Цели и результат проекта*

Заинтересованной стороной проекта является кафедра ТФ ФТИ Томского Политехнического Университета.

В таблице 3.5 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей

Таблица 3.5 – Цели и результат проекта

Цели проекта	Получение результатов теоретических расчетов по изотопу лития для нейтронно-захватной терапии
Ожидаемые результаты:	Получить перспективные результаты исследований
Критерии приемки результата проекта:	Хорошие показатели относительно других изотопов
Требования к результату проекта:	Хорошие показатели
	Низкая травматичность
	Малое время проведения

### 3.2.1 Организационная структура проекта

На данном этапе работы решались следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого

участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эти информации указаны в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Организационная структура проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
1	Видяев Д.Г. доцент кафедры Технической физики Томского политехнического университета	Руководитель по ВКР (НИР)	1. Разработка ТЗ на ВКР 2. Составление и утверждение технического задания 3. Теоретические исследования 4. Разработка методики теоретических исследований 5. Проведение расчетов 6. Анализ и обработка полученных результатов 7. Обобщение и оценка эффективности полученных результатов	8 16 32 36 60 16 16
2	Тюделеков Е.А. магистрант	Исполнитель по научному исследованию	1. Выбор направления исследования и способов решения задач 2. Сбор и изучение научно- технической литературы 3. Теоретические исследования 4. Разработка методики теоретических исследований 5. Проведение расчетов 6. Анализ и обработка полученных результатов 7. Обобщение и оценка эффективности полученных результатов 8. Оформление пояснительной записки 9. Подготовка к защите ВКР	56 226 48 36 56 16 16 48 48
<b>Итого</b>				<b>686</b>

### 3.2.2 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела определены ключевые события проекта, их даты и результаты. Эта информация представлена на таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка ТЗ на ВКР	17.03.2016	
1.1	Составление и утверждение технического задания	18.03-19.03.2016	Приказ о защитах ВКР
2	Выбор направления исследования и способов решения задач	20-26.03.2016	
2.1			
2.2	Сбор и изучение научно-технической литературы	27.03-18.04.2016	Список литературы
3	Теоретические исследования	19.04-30.04.2016	
3.1	Разработка методики теоретических исследований	19.04-08.05.2016	Методика
3.2	Проведение расчетов	12.05-24.05.2016	
3.3	Анализ и обработка полученных результатов	26-29.05.2016	Результаты расчетов
4	Обобщение и оценка эффективности полученных результатов	30.05-03.06.2016	
4.1			
4.2	Оформление пояснительной записки	04-10.06.2016	Магистерская диссертация
4.3	Подготовка к защите ВКР	11-17.06.2016	

### 3.2.3 План проекта

В рамках планирования выпускной квалификационной работы построен календарный график работы (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников Ф.И.О
1	Разработка ТЗ на ВКР	1	17.03.2016	17.03.2016	руководитель
1.1	Составление и утверждение технического задания	2	18.03.2016	19.03.2016	руководитель
2	Выбор направления исследования и способов решения задач	6	20.03.2016	26.03.2016	дипломник
2.1					

Продолжение таблицы 3.8

2.2	Сбор и изучение научно-технической литературы	29	27.03.2016	24.04.2016	дипломник
3	Теоретические исследования	10	25.04.2016	5.05.2016	руководитель, дипломник
3.1	Разработка методики теоретических исследований	10	26.04.2016	05.05.2016	руководитель, дипломник
3.2	Проведение расчетов	12	12.05.2016	24.05.2016	руководитель, дипломник
3.3	Анализ и обработка полученных результатов	4	26.05.2016	29.05.2016	руководитель, дипломник
4	Обобщение и оценка эффективности полученных результатов	4	30.05.2016	03.06.2016	руководитель, дипломник
4.1					
4.2	Оформление пояснительной записки	6	04.06.2016	10.06.2016	дипломник
4.3	Подготовка к защите ВКР	6	11.06.2016	17.06.2016	дипломник
<b>Итого</b>		90			

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Построен график в виде табл. 3.9 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. Работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 3.9 – Календарный план – график проведения ВКР по теме

№ работы (из ИСР)	кал. дн.	Исполнители	Март		Апрель			Май			Июнь	
			Декады									
			1	2	1	2	3	1	2	3	1	2
1	1	Р										
1.1	2	Р										
2	6	Д										
2.1												
2.2	29	Д										
3	10	Р,Д										
3.1	10	Р,Д										
3.2	12	Р,Д										
3.3	4	Р,Д										
4	4	Р, Д										
4.1												
4.2	6	Д										
4.3	6	Д										

 - Дипломник     - Руководитель

### 3.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

#### 3.3.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

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

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$C_M = (1 + k_T) \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i}, \quad (3.2)$$

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

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

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

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов. Примем  $k_T$  равным 0,2.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 3.10.

Таблица 3.10 – Материальные затраты

Наименование	Количество, шт.	Цена за ед., руб.	$C_M$ , руб.
Шариковая ручка	1	40	48
Тетрадь формата А4	1	300	360
Итого:			408

На статью "Спецоборудование" для разработки и экспериментальных работ относятся затраты на приобретение, изготовление, аренду или амортизационные отчисления специальных приборов, устройств и т.д. При выполнении данной работы всё используемое оборудование собственное.

Сумма амортизационных отчислений рассчитывается по следующей формуле:

$$C_a = \sum_i^n \frac{C_{бал} \cdot H_a \cdot g_i \cdot t}{\Phi_{эф}} \quad (3.3)$$

где  $C_{бал}$  – стоимость  $i$ -го вида оборудования, руб;

$H_a$  – норма годовых амортизационных отчислений;

$g_i$  – количество единиц  $i$ -го вида оборудования;

$t$  – время работы  $i$ -го вида оборудования;

$\Phi_{эф}$  – эффективный фонд времени работы оборудования.

Эффективный фонд рабочего времени  $\Phi_{эф}$  рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi_{эф} = (\Phi_{кал} - \Phi_{пр,вых}) \cdot k_{см} \cdot k_{нп} \quad (3.4)$$

где  $\Phi_{кал}$  – количество календарных дней в году, дни;

$\Phi_{пр,вых}$  – количество праздничных и выходных дней в году, дни;

$k_{см}$  – коэффициент сменности (в данном случае  $k_{см}=1$ );

$k_{н.п.}$  – коэффициент неучтённых потерь ( $k_{н.п.}=20 \square 30 \%$ ).

Эффективный фонд рабочего времени составляет 250 дней.

Таблица 3.11 – Расчёт затрат по статье "Спецоборудование"

Наименование оборудования	Стоимость оборудования, руб.	Норма Амортизации, %	Время использования, час	Сумма амортизационных отчислений, руб.
Компьютер	20000	25	300	750
Итого по статье $C_a$				750

Затраты на потребляемую электроэнергию рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{эл} = W_y \cdot T_g \cdot S_{эл} \quad (3.5)$$

где  $W_y$  – установленная мощность, кВт;

$T_g$  – время работы оборудования, час;

$S_{эл}$  – тариф на электроэнергию.

Тариф в 2016 в Томской области на электроэнергию составляет – 2,28 руб/кВт·час. Расчёт затрат на потребляемую электроэнергию представлен в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Расчёт затрат на потребляемую электроэнергию

Наименование оборудования	Мощность прибора, кВт	Продолжительность работы, час	Сумма, руб.
Компьютер	0,3	280	191,52
Лампа дневного освещения (8шт.)	0,4	500	456
Итого по статье С <sub>3</sub>			647,52

Таблица 3.13 – Группировка затрат по статьям

Наименование статей затрат	Сумма, рублей
Материальные затраты	408
Сумма амортизационных отчислений	750
Затраты на потребляемую электроэнергию	647,52
Затраты на оплату труда работников, непосредственно занятых созданием НИР	42599,4
Отчисления на социальные нужды	8889,3
Накладные расходы	23704,79
Итого себестоимость, С <sub>нир</sub> руб	76999,01

### 3.3.2 Основная заработная плата

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (3.6)$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Для руководителя:  $C_{ЗП} = 26937,262 + 2693,73 = 29630,992$  руб.

Основная заработная плата руководителя  $Z_{ОСН}$  рассчитывается по формуле:

$$Z_{ОСН} = Z_{ДН} \cdot T_{РАБ} \quad (3.7)$$

где  $T_{РАБ}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн. (таблица 3.12);

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

Значит, для руководителя:  $Z_{ОСН} = 1224,421 \cdot 22 = 26937,262$  рублей

для дипломника:  $Z_{ОСН} = 229,737 \cdot 68 = 15622,116$  рублей

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{ДН} = (Z_M \cdot M) / F_D \quad (3.8)$$

где  $Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб (в качестве месячного оклада магистра выступает стипендия, которая составляет 5674,5руб);

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

при отпуске в 48 раб.дней  $M=0,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях) (таблица 3.14).

Тогда, для руководителя:

$$Z_{ДН} = \frac{30243,2 \cdot 10}{247} = 1224,421 \text{ рублей}$$

$$Z_{ДН} = \frac{5674,5 \cdot 10}{247} = 229,737 \text{ рублей}$$

Баланс рабочего времени представлен таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Дипломник
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	56	104
-праздничные дни	14	14

Продолжение таблицы 3.14

Потери рабочего времени		
-отпуск	48	24
-невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	247	223

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_M = Z_B \cdot K_P \quad (3.9)$$

где  $Z_B$  – базовый оклад, руб;

$K_P$  – районный коэффициент, равный 1,3.

Заработная плата ассистента составляет 23264,88 руб., согласно «Положению об оплате труда» ТПУ.

Для руководителя:  $Z_M = 23264,88 \cdot 1,3 = 30243,2$  руб.

Результаты расчета основной заработной платы представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15- Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	$Z_b$ , руб.	$K_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{дн}$ , руб.	$T_{раб}$ , раб.дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	23264,88	1,3	30243,2	1224,42	22	26937,262
Дипломник	5674,5			229,737		15622,116
Итого $Z_{осн}$						42599,4

### 3.3.3 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{доп} = K_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (3.10)$$

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

$K_{ДОП}$  – коэффициент дополнительной зарплаты ( $k_{доп} = 0,1$ );

$Z_{ОСН}$  – основная заработная плата, руб.

Для руководителя:  $Z_{ДОП} = 26937,262 \cdot 0,1 = 2693,73$  рублей

### 3.3.4 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{внеб} = K_{внеб} \cdot (Z_{ОСН} + Z_{ДОП}) \quad (3.11)$$

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

$$C_{внеб} = 0,3 \cdot (26937,262 + 2693,73) = 8889,3 \text{ руб.}$$

### 3.3.5 Научные и производственные командировки

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов научного и производственного персонала. Для данной работы, затраты по этой статье нулевые.

### 3.3.6 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

На эту статью относится стоимость контрагентных работ, т.е. работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями по заказу данной научно-технической организации, результаты которых используются в конкретном НИИ. Затраты равны нулю, т.к. все работы осуществляются своими силами.

### 3.3.7 Накладные расходы

В эту статью относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70-90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = K_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{ОСН}} + Z_{\text{ДОП}}) \quad (3.12)$$

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

$$C_{\text{накл}} = 0,8 \cdot (26937,262 + 2693,73) = 23704,79 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составлена калькуляция плановой себестоимости НТИ приведенная в табл. 13.

### 3.4 Оценка сравнительной эффективности исследования

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} \quad (3.13)$$

где  $I_{\phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;

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

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

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p \quad (3.14)$$

где  $I_m$  - интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  - весовой коэффициент  $i$ -го варианта параметра;

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

$n$  – число параметров сравнения.

Таблица 3.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Повышение производительности труда пользователя	0,25	5	4	4
2. Надежность	0,3	5	4	4
3. Безопасность	0,25	4	3	3
4. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,2	4	4	3
ИТОГО	1	18	15	14

$$I_{III} = 0,25 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 4,55$$

$$Аналог1 = 0,25 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4 + 0,25 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 = 3,75$$

$$Аналог2 = 0,25 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4 + 0,25 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 = 3,55$$

Таким образом, по результатам расчетов получили, что для выполнения НИР требуется два человека: научный руководитель и дипломник. Проведен SWOT-анализ и составлена итоговая матрица SWOT-анализа. Приведен план проекта и рассчитан бюджет научного исследования.

Итоговая себестоимость НИР составила 76999,01 рублей, время, необходимое для ее выполнения, составило 90 календарных дней.

На основе расчета интегрального показателя с определением двух средневзвешенных величин финансовой эффективности и ресурсоэффективности научного исследования увидели что, сравнительная оценка текущего проекта выше.

## **ГЛАВА 4 Социальная ответственность**

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Одновременно должно осуществляться последовательное повышение качества и эффективности всех средств коллективной и индивидуальной защиты от вредных и опасных производственных факторов, увеличение объема их производства до полного удовлетворения потребностей народного хозяйства и рациональное их использование.

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

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Сложность поставленных задач требует использования достижений многих научных дисциплин, прямо или косвенно связанных с задачами создания безопасных условий труда. При разработке требований производственной санитарии используются результаты исследований ряда медицинских и биологических дисциплин.

Успех в решении проблем охраны труда в большой степени зависит от качества подготовки специалистов в этой области, от их умения принимать правильные решения в сложных и изменчивых условиях современного производства.

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

#### 4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Основные элементы производственного процесса представлены в таблице 4.1.

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

Наименование видов работ и параметров производственного	Факторы ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
НИ ТПУ ФТИ кафедра «Техническая физика», Работа с ЭВМ		Электрический ток	ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

Продолжение таблицы 4.1

	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)		СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
		Пожарная опасность	Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

При работе на ЭВМ, на студента могут воздействовать следующие факторы:

Физические:

- температура и влажность воздуха;
- шум;
- статическое электричество;
- электромагнитное поле низкой частоты;
- освещённость;
- наличие излучения;

Психофизиологические:

- физические перегрузка (статическая, динамическая);
- нервно-психические перегрузки (умственные перегрузки, перегрузки анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

## **4.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов**

### **4.2.1 Организационные мероприятия**

Работник обязан:

- соблюдать требования охраны труда;
- правильно применять средства индивидуальной и коллективной защиты;
- проходить обучение безопасным методам и приемам выполнения работ и оказанию первой помощи пострадавшим на производстве, инструктаж по охране труда, стажировку на рабочем месте, проверку знаний требований охраны труда;
- немедленно извещать своего непосредственного или вышестоящего руководителя о любой ситуации, угрожающей жизни и здоровью людей, о каждом несчастном случае, происшедшем на производстве, или об ухудшении состояния своего здоровья, в том числе о проявлении признаков острого профессионального заболевания (отравления);
- проходить обязательные предварительные (при поступлении на работу) и периодические (в течение трудовой деятельности) медицинские осмотры, другие обязательные медицинские осмотры, а также проходить внеочередные медицинские осмотры по направлению работодателя в случаях, предусмотренных настоящим Кодексом и иными федеральными законами.

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы

квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальной удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

#### **4.2.2 Требования безопасности при выполнении работ с использованием персональных электронно-вычислительных машин**

Организация и охрана труда при работе на ПЭВМ, регулируется:

– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»;

##### **4.2.2.1 Общие требования**

Продолжительность и организация рабочего дня для сотрудников, работающих с ПЭВМ определяются Правилами внутреннего распорядка университета. В особых случаях продолжительность рабочего дня может быть изменена решением администрации в установленном порядке, при этом ежедневная работа высокой интенсивности и с нервно–эмоциональным напряжением по 12 и более часов не допускается. При работе на ПЭВМ сотрудники могут быть подвергнуты воздействию вредных производственных факторов:

- шум и вибрация
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- повышенный уровень статического электричества;
- перенапряжение зрительных анализаторов
- статические физические перегрузки;

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность,

скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

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

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20–25 °С, зимой – 13–15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь

организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

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

Плотность магнитного потока должна быть не более:

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. Конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 7,7-10 А/кг, что соответствует эквивалентной дозе, равной 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.



При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 – 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте 3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

Оконные проемы в помещениях, где используются персональные компьютеры, должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков и др.

### **4.3 Электробезопасность**

Электробезопасность — система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Анализ опасности электрических сетей практически сводится к определению значения тока, протекающего через тело человека в различных условиях, в которых может оказаться человек при эксплуатации электрических сетей.

При прохождении электрического тока через тело человека могут возникнуть повреждения организма. Действие тока на организм человека может быть местным и общим. Общее (рефлекторное) поражение — электрический удар, представляет для человека наибольшую опасность: нарушается работа центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, что приводит к фибрилляции и параличу сердца, а также к остановке дыхания.

Безопасной для человека является величина переменного тока — 10 мА, постоянного — 50 мА, безопасное напряжение 12 В.

Во избежание травматизма следует, соблюдать следующие правила:

- должна быть изучена инструкция по эксплуатации аппаратуры, а перед каждым включением производится осмотр рабочего места;
- обращать особое внимание на последовательность включений и выключения питания отдельных узлов;
- Все узлы комплекса должны быть заземлены через контур заземления;
- Контур заземления периодически проверяется на электрическое сопротивление.

Меры первой помощи зависят от состояния пострадавшего, которые определяются путём проведения следующих мероприятий:

1. уложить пострадавшего спиной на твёрдую поверхность;
2. проверить наличие дыхания и пульса;
3. выяснить состояние зрачка.

Если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока - обеспечить ему условия для полного покоя, следить за дыханием и пульсом, вызвать врача.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но дышит и прощупывается пульс, необходимо привести его в сознание, дать понюхать нашатырный спирт и обрызгивать водой, при необходимости делать искусственное дыхание и массаж сердца.

Характер и последствия поражения зависят от величины, частоты и пути прохождения тока; продолжительности воздействия. Поэтому помощь должна быть оказана немедленно. При оказании первой помощи пострадавшего необходимо отсоединить от токоведущей части, одновременно защищая себя от опасности контакта с тоководами.

В первую очередь надо отключить ток. При легких поражениях пострадавшего следует вынести на свежий воздух. Если дыхание очень резкое и судорожное, необходимо сделать искусственное дыхание. При остановке дыхания и отсутствии пульса делают искусственное дыхание и непрямой массаж сердца. Затем необходима госпитализация.

#### 4.4 Пожарная и взрывная безопасность

Пожар – это неконтролируемый процесс горения, развивающийся во времени и пространстве, опасный для людей и наносящий материальный ущерб.

Пожарная и взрывная безопасность – это система организационных мероприятий и технических средств, направленная на профилактику и ликвидацию пожаров и взрывов на производстве.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются 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.

Запрещается:

- использовать электронагревательные приборы;
- эксплуатировать провода электроприборов с поврежденной изоляцией;
- пользоваться поврежденными розетками, рубильниками, вилками и прочим электрооборудованием;
- обертывать (накрывать) светильники, бытовые приборы бумагой, тканью и другими горючими материалами;
- применять открытый огонь;

- курить в помещении;
- оставлять без наблюдения включенную в сеть радиоэлектронную аппаратуру, ПЭВМ, оргтехнику, бытовую технику;
- пользоваться неисправной или незаземленной аппаратурой;
- нарушать правила эксплуатации ПЭВМ и оргтехники, а так же инструкции по работе на ПЭВМ и средствах оргтехники, действующие в институте;
- включать в сетевые фильтры, блоки бесперебойного питания и специализированные розетки, расположенные в коробах бытовую технику и другое, не относящееся к ПЭВМ оборудование.

По окончании работы необходимо обесточить все электроприборы и осмотреть помещения на наличие признаков возгорания. При наличии в помещении выделенной сети электропитания для ПЭВМ, необходимо выключить автомат питания в распределительном щите.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел.

112.

3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## **Заключение. Выводы**

Современные технологии терапии с использованием нейтронов являются одними из наиболее эффективных и перспективных способов лечения злокачественных новообразований и разного рода опухолей. Поэтому создание новых источников терапевтических нейтронов, переориентирование старых установок на проблемы нейтронной терапии, разработка и организация серийного выпуска фармацевтических соединений, характеризующихся высокой функциональной эффективностью, клинической и радиационной безопасностью, создание базы для медицинских исследований и лечение является актуальной задачей, имеющей огромное медико-социальное значение.

На основании результатов исследований, приведенных в данной работе, можно сделать следующие выводы:

1. В результате проведенного обзора установлено, что основными перспективными изотопами в нейтрон – захватной терапии являются  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$  и  ${}^{157}\text{Gd}$ , а в качестве источников нейтронов используются реакторы и ускорители.

2. Отработана методика расчета основных параметров эффективности нейтрон-захватной терапии.

3. На основе полученной методики проведен расчет параметров для изотопов  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$  и  ${}^{157}\text{Gd}$  и двух видов нейтронов (тепловых и УХН).

Установлено, что количество ядерных реакций за 1 час облучения для всех трех изотопов удовлетворяет условию уничтожения раковой клетки, как в случае тепловых нейтронов, так и УХН.

Показано, что по мощности поглощенной дозы значения для лития и бора примерно равны (0,131 и 153 Гр/мин, для УХН 0,0357 и 0,0437 Гр/мин), а наибольшее значение (2,16 и 0,591 Гр/мин) имеет гадолиний.

Установлено, что на перспективность и эффективность использования того или иного изотопа, и в частности лития, при нейтрон-захватной терапии, помимо ядерных свойств существенное влияние оказывают экологические, биологические и экономические аспекты.

4. Проведен экономический расчет затрат на выполнение выпускной квалификационной работы и составлен план-график проведения работ.

5. Рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности при выполнении выпускной квалификационной работы.

В целом, проведенные исследования относятся к ядерной медицине и их результаты могут быть использованы для реализации нейтрон-захватной терапии.

## Список публикаций

1. Тюделеков Е.А. Перспективы использования лития для нейтрон-захватной терапии // Изотопы: технологии, материалы и применение: материалы II Междунар. научной конф.; г. Томск, октябрь 2015 г. – Томск: изд-во Графика, 2015. – С. 52.

2. Орлов А.А., Видяев Д.Г., Тюделеков Е.А. Кинетические и термодинамические характеристики процесса разделения щелочных металлов // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сб. тез. докл. VII Междунар. научно-практ. конф.; г. Томск, июнь 2015 г. – Томск: изд-во ТПУ, 2015. – С. 201-202.

## Список литературы

1. <http://globocan.iarc.fr>
2. [http://www.cancer.ic.ck.ua/index\\_5\\_1.htm](http://www.cancer.ic.ck.ua/index_5_1.htm)
3. Храмов Ю. А. Чэдвик (Чадвик) Джеймс (Chadwick James) // Физики: Биографический справочник / Под ред. А. И. Ахиезера. — Изд. 2-е, испр. и дополн. — М.: Наука, 1983. — С. 295. — 400 с. — 200 000 экз. (в пер.).
4. Ю.Н. Коблик, Г.А. Абдуллаева, Г.А. Кулабдуллаев, А.А. Ким, Г. Джураева, К.А. Беласаров, Ж.Н. Каххаров, И.Р. Мавлянов «Канал эпитепловых нейтронов для медико-биологических исследований на атомном реакторе ИЯФ АН РУз». Ж. Медицинская физика 3, 51, 31 (2011).
5. Par P. Ageron, J.M. Astruc, H. Geipel, J. Verdier La source de neutros froids du reacteur a haut flux. B.I.S.T. Commussariat a l'Energie Atomique N 166 Janvier 1972.
6. I.S. Altarev, et. al. A Liquid hydrogen source of ultra-cold neutrons Physics Letters, vol. 80A, n. 5, 6, 22 Dec. 1980, p. 413-416.
7. R. Golub, et. al. Operation of a Superthermal Ultra-Cold Neutron Source and the Storage of Ultra-Cold Neutrons in Superfluid Helium. Zeitschrift fur Physik B (Condensed Matter), 51. 187-193 (1983).
8. R. Golub, J. M. Pendlebury The interaction of ultra-cold neutrons (UCN) with liquid helium and a superthermal UCN source. Physics Letters, vol. 62A, # 5, p. 337.
9. Гончаро В.В., Егоренко П.М., Архангельски Н.В. и др. Создани реактор ИР-8 в ИА имен И.В.Курчатов (реконструкци реактор ИРТ-М). Труд совещани специалисто п обмен опыто реконструкци И в странах-члена СЭВ. Москва, 1982. М.: ГКАЭ, 1984, с. 5–26.
10. Е.П. Рязанцев, В.А. Насонов, П.М. Егоренков, В.В. Яковлев, А.Ф. Яшин, И.А. Кузнецов, В.Н. Рожнов. Экспериментальные возможности и перспективы использования реактора ИР–8 РНЦ «КИ» для фундаментальных и прикладных исследований, г. Москва–2006, с. 9.

11. Ю.Е. Песня. Расчетное обеспечение экспериментальных исследований на реакторе ИР–8 с использованием прецизионной программы MCU–PTR. Москва 2015, с.14.
12. Хмелевский Е.В. Современное состояние и перспективы нейтрон–захватной лучевой терапии, Российский научный центр рентгено радиологии Росмедтехнологий, г. Москва.
13. Саркисов Д.С. Перов Ю.Л. Микроскопическая техника М.: «Медицина», 1996.
14. Г. И. Борисов Теоретические и экспериментальные физические методы нейтронно – захватной терапии // Физика элементарных частиц и атомного ядра 2011. Т.42 вып.5, с.10-11.
15. <http://www.webelements.narod.ru/elements/Li.htm>.
16. Г. И. Борисов Теоретические и экспериментальные физические методы нейтронно – захватной терапии // Физика элементарных частиц и атомного ядра 2011. Т.42 вып.5, с.12.
17. Г.И. Борисов Теоретические и экспериментальные физические методы нейтронно – захватной терапии, с.11.
18. Sheino I.N. // Proc. of the 12th Intern. Congress on Neutron Capture Therapy, Japan, 2006. P. 531-534.
19. Cerullo N., Bufalino D., Daquino G. // Proc. of the 13<sup>th</sup> ICNCT, Italy, 2008. P.541.
20. Бекман И. Н. Лекция 7. Лучевая терапия // Курс лекций «Ядерная медицина». — М.: МГУ, 2006.
21. Nesvizhevsky V.V. Polished sapphire for ultracold–neutron guides. – Nucl. Instrum. Meth., 2006, v. A 557, p. 576–579.
22. Патент РФ 2212260 Способ планирования нейтрон – захватной терапии. Авторы С.Е. Ульяненко, С.Н. Корякин, В.А. Ядровская и др.
23. И.И. Гуревич, В.П. Протасов. Нейтронная физика. – М.: Энергоатомиздат, 1997, с.408–409.

24. И.И. Гуревич, В.П. Протасов. Нейтронная физика. – М.: Энергоатомиздат, 1997, с.341.
25. P.M. Macklis, Y.J. Lin, B. Beresford et al. Cellular kinetics, dosimetry and radiobiology of alpha-particle immunotherapy: induction of apoptosis. Radiat. Res. 1992. V.130. p.220 – 226.
26. В.Ю. Баранов. Изотопы: свойства, получение, применение. Т.2, М.: Физматлит, 2005, с.375.
27. Я.Б. Зельдович // ЖЭТФ, 1959, т.36, стр.1952.
28. И.И. Гуревич, В.П. Протасов. Нейтронная физика. – М.: Энергоатомиздат, 1997, с.331 – 342.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### NEUTRON CAPTURE THERAPY OF CANCER

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Б	Тюделеков Евгений Александрович		

Консультант кафедры ТФ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Видяев Дмитрий Геннадьевич	д. т. н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ермакова Янина Викторовна			

## **ABSTRACT**

This chapter refers to the neutron capture therapy. We consider such things as neutron sources for this type of cancer treatment, management and operation of the facility, and what neutron capture therapy is. As an overview of the isotopes which are used in this type of therapy. The reaction of their interaction with the neutrons is described, which energy is released as a result of the interaction and importance of the neutron capture cross section of a given isotope.

## CONTENTS

INTRODUCTION.....	95
A.1 THE METHOD OF THE NEUTRON CAPTURE THERAPY OF CANCER...	96
A.2 NEUTRON SOURCES FOR CAPTURE THERAPY .....	97
A.2.1 Possible sources of neutrons .....	97
A.2.2 Converted thermal reactors using spectrum shifting and filtering.....	97
A.2.3 Fast reactors.....	98
A.2.4 New reactor designs .....	98
A.3 ISOTOPES NEUTRON CAPTURE THERAPY .....	100
A.4 IRRADIATION FACILITY OPERATION AND MANAGEMENT .....	102
A4.1 Operation of the facility .....	102
A4.1.1 Reliability .....	102
A4.1.2 Availability .....	102
A4.1.3 Continuous versus intermittent operations.....	102
A4.1.4 Personnel at the NCT facility .....	103
A.5 NCT RADIOTHERAPY INFRASTRUCTURE .....	104
A.5.1 Patient treatment room .....	104
A.5.2 Medical staff requirements.....	105
A.5.3 Personal dosimetry .....	105
A.5.4 On-line-beam monitoring system.....	105
A.5.5 Blood preparation concentration measurement system .....	105
A.6 NON-TECHNICAL CONSIDERATIONS .....	106
A.6.1 Public acceptance .....	106
A.6.2 Ethical issues .....	106
A.6.3 Economics .....	107
A.6.4 Licensing .....	107
A.6.5 Liability .....	107
A.6.6 Administration approval and support.....	108
CONCLUSION .....	109
REFERENCES.....	110

## INTRODUCTION

Conventional radiation therapy involves the use of high-energy X ray or electron beams. This form of radiation is termed "sparsely ionizing" and is described as having a low linear energy transfer (LET) since the energy depositions in tissue as ionizations are spatially infrequent. A higher absorbed dose to tumour relative to normal tissue is achieved by precise geometric target localization, judicious computer-aided treatment planning and accurate beam delivery systems. Radiotherapy also attempts to exploit the subtle differences in the sensitivity to fractionation between tumour and normal tissues at the biological level. The biological response to ionizing radiation also depends on the type of radiation and is characterized by its relative biological effectiveness (RBE). Over the energy range of therapeutically used X rays, typically 100 kV to 25 MV, approximately the same physical dose needs to be delivered at different energies to reach a given biologic endpoint, resulting in similar RBEs. High LET radiations, however, result in biologic damage that is generally larger per unit dose than for X rays, resulting in an elevated RBE. Hence a lower dose is required to achieve an equivalent effect.

The neutron-capture therapy (NCT) - radiotherapy method, in which the reaction between neutrons and radiosensitive medicines. The method of the neutron capture therapy of cancer comprising administering to the affected organ or tissue of human medicine containing an isotope with a high neutron absorption cross section, and the subsequent exposure of the affected organ or tissue of a nuclear reactor neutrons.

One of the promising methods that meet the requirements of increasing the effect of radiation exposure and the space-time optimization of therapy in the near future may become very cold and NCT ultracold neutrons with kinetic energy below  $10^{-4}$  and  $10^{-7}$  eV, respectively. A unique feature of neutrons - the ability to experience total reflection from the surface of condensed matter at any angle of incidence, and navigate through a flexible neutron guides.

## **A.1 THE METHOD OF THE NEUTRON CAPTURE THERAPY OF CANCER**

The plant consists of a reactor core, the neutron reflector, the horizontal channel, cryogenic converter - source ultracold neutrons vacuum neutron guide for the delivery of neutrons to the place of medical procedures for neutron capture therapy, flexible neutron-catheter neutrons supplied directly to the affected organs or tissues.

Neutrons from the reactor core by a horizontal tangent at low temperature serves channel converter filled with liquid superfluid helium. The wall of the converter is made of nickel isotope which provides total reflection of ultracold neutrons at the border. Also, the outside of the converter is surrounded by thermal and radiation protection.

As a result of scattering by the nuclei of helium superfluid neutron losing virtually all of the energy. Neutrons with energy  $\sim 10^{-7}$  eV and the length of the coherent scattering is less than zero through a thin transparent window is fed into a vacuum neutron guide by which are transported to the experimental room where the experiments were carried out on the NCT or medical procedures. As a neutron wall material is nickel.

If necessary, the neutron beam can be blocked by means of neutron gates representing an opaque screen for ultracold neutrons made of nickel.

The end portion of the neutron is formed as a flexible catheter neutron bellows - a thin walled metal bellows. By catheter ultracold neutrons are delivered directly to the affected body of the esophagus, mouth, bronchitis, urinary tract, the rectum or the other way.

The proposed method of the invasive neutron capture therapy of malignant tumors allows for the use of beams of ultracold neutrons to minimize damage to healthy tissue of the patient, transporting a neutron beam to deep tumors, effectively influence the small size of the tumor.

## **A.2 NEUTRON SOURCES FOR CAPTURE THERAPY**

### **A.2.1 Possible sources of neutrons**

At present, facilities available for NCT clinical trials are limited, and the only neutron sources for clinical NCT are (thermal) research reactors. Because of this, efforts have been made to modify a number of existing reactors for NCT, with a few new research reactor design projects being started. Since a reactor is usually used for many other applications besides NCT, conflicts or limitations on the NCT work often arise. Additionally, most reactors are separated from hospitals, and their use for clinical trials can present some difficulties. For these reasons, there has been some research regarding the installation of NCT facilities at hospitals. Sources of neutrons suggested for this purpose have included dedicated single-purpose reactors, accelerator-based neutron sources, and the use of  $^{252}\text{Cf}$  sources.

### **A.2.2 Converted thermal reactors using spectrum shifting and filtering**

Most facilities currently involved with NCT are general purpose research reactors which have been modified for this application. There are two basic methods to get the appropriate neutron flux at the treatment location outside of a thermal reactor. These are broadly termed spectrum shifting and filtering.

Spectrum shifting moderates the fast neutrons leaking from the core down to an appropriate lower energy for NCT. This means either epithermal or thermal energy neutrons. When a reactor has a large aperture irradiation facility such as a thermal column, then the spectrum shifting method is usually used, either by itself or in combination with a filter. In a reactor where only a rather narrow and long beam tube is available, the filtering technique must be used. Filtering transmits neutrons of the desired energy while blocking those of other energies. Generally, filtering is more wasteful of neutrons so that a much higher original source flux is needed. If one compares the neutron flux at the irradiation position relative to the reactor power, the shifting technique gives a much higher flux-to-power ratio than the filtering

technique. A review of facilities currently in operation indicates that spectrum shifting, supplemented by filtering, is used much more frequently than filtering alone.

### **A.2.3 Fast reactors**

While the majority of nuclear reactors potentially available for NCT are thermal reactors, a few fast reactors are also found [1]. Since the initial source of neutrons at the irradiation position is fast neutrons leaking from the core, a fast reactor can have much higher flux-to-power ratio than a thermal one of the same power. Indeed, it appears that a 5 kW fast reactor can produce sufficient epithermal neutrons for patient treatment. The low power and compact core of a fast reactor permit a very compact NCT facility. However, the fast reactor needs highly enriched uranium (HEU) fuel, the limited availability of which restricts its likely application. In addition, experience with the application of fast reactors to NCT is very limited.

### **A.2.4 New reactor designs**

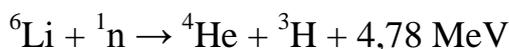
The idea of a newly constructed reactor for BNCT has some attraction. The most positive arguments compared to converting existing facilities are that it can be built near a hospital, in a large population centre where the therapy is needed. In addition, patient treatment considerations can be incorporated from the beginning, thereby providing the highest level of care and comfort. The efficiency of such a facility can be very high.

Not surprisingly, a new research reactor where NCT has been considered from the beginning is likely to be much more efficient in a number of respects, and would probably use the spectrum shifting concept. Reference [2] discusses the design of such a facility for a hospital. If its design is optimized, sufficient neutron flux at multiple irradiation positions can be available even at low power. In addition, it can have an integrated facility for prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) of boron in blood. Facilities for microscopic boron distribution measurement, and a thermal neutron beam for NCT research using in vitro cells and small animals, and

superficial tumour therapy could also be incorporated. From the technical point of view, designing an extremely safe and effective reactor specifically for NCT is very feasible. However, for a dedicated NCT reactor, an important factor that should be considered is that of public acceptance because of its installation in a medical center. Estimates of experts indicate that the construction of new BNCT facility costs about 5–7 million Euro, whereas adaptation of an old one costs 2–4 million Euro.

### A.3 ISOTOPES NEUTRON CAPTURE THERAPY

#### **${}^6\text{Li}$ isotope. Dose-forming reaction ${}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{H}$ .**



The cross section  $\sigma_{\text{Li}} = 945$  barn. The total energy of the reaction products is  $E_{\text{N}} = 4780$  keV, ( $E_{\text{N}} = 2730$  keV,  $E_{\text{H}} = 2050$  keV), i.e. more than twice the energy of the products of the reaction  ${}^{10}\text{B} (n, \alpha\gamma) {}^7\text{Li}$ .  $\alpha$ - particles ( ${}^4\text{He}$ ), is characterized by high LET and path quantity in the order of 59 microns of tissue, comparable to the size of the cell nucleus. Tritium path length of about 1-2 microns.

The cross section of  $(n, \alpha)$  - reaction of natural lithium containing 7,5% of total 71 barns. Therefore, natural lithium, as well as natural forest, enriched by  ${}^6\text{Li}$  isotope to 90%. Nuclear  ${}^6\text{Li}$  characteristics in terms of neutron capture therapy several superior  ${}^{10}\text{B}$ . Lithium present in small amounts in living organisms, but apparently does not perform any biological functions. In the body of the average man (weight 70 kg) contains about 0,7 mg of lithium. The toxic dose of 90-200 mg [3], that is 1,29-2,82 mg / kg.

#### **The isotope ${}^{10}\text{B}$ . Dose-forming reaction ${}^{10}\text{B} (n, \alpha\gamma) {}^7\text{Li}$ .**



${}^{10}\text{B}$  content in the natural mixture of boron isotopes is 19,6%. To use NCT products with highly enriched for  ${}^{10}\text{B}$ . The cross section of this reaction for thermal neutrons is equal to 3870 barn on the isotope  ${}^{10}\text{B}$  and 750 barn in the natural mixture of isotopes of boron. Energy  $\alpha$ - particles  $E_{\alpha} = 1470$  keV, and nuclide  $E_{\text{Li}}^7 = 840$  keV. The particles are emitted in opposite directions, and their total run in biological tissue does not exceed 12 microns. The spatial distribution of the components of the absorbed neutron dose virtually coincides with the field of slow neutrons in the object.

Moreover, a significant portion of the tracks of heavy charged particles from the reaction almost fit into the size of a biological cell. All reactions are also accompanied by emission of a photon with energy  $E_{\gamma} = 477,6$  keV. The contribution of this radiation absorbed dose of neutrons is negligible. However, the presence of the

photon radiation plays a significant positive role for remote dosimetry of neutrons at NCT. When the boron content in the natural biological tissue contribution of this reaction in the absorbed dose is small. In intramuscular BSH- preparations with enriched boron concentration can be achieved in the tumor  $^{10}\text{B}$  to 30-35 ppm.

**The natural mixture of Gd isotopes. Dose-forming reaction  $^{157}\text{Gd} (n, \gamma)$   
 $^{158}\text{Gd}$ .**



The cross section of radiative capture of thermal neutrons in the reaction of 248000 barn, and natural mixture of isotopes 46600 barn.  $^{157}\text{Gd}$  content in the natural mixture is 15.7%. The binding energy of a neutron in the nucleus of gadolinium is 7937 keV. This is the total energy released in this reaction. The major reaction product is a rigid nonvolatile photon emission (due to high levels of density) portion of the spectrum centered mostly in the energy range from 2 to 3 MeV.

Gadolinium as a dose-forming drug for NCT could never be considered. But, unfortunately, this area has a lot of supporters. Oddly enough, but the 4-7 September 1966 in Zurich at the seventh International Symposium on Neutron Capture Therapy of tumors worked an entire section of the self-treatment gadolinium adherents. There he is now [4,5].

Essentially gadolinium neutron-photon therapy is therapy. At the same time the photons are produced with the help of neutron nuclear reactor. This photon therapy is extremely expensive and traumatic in relation to radiation, because in only a small part of the energy of photons absorbed by the irradiated tumor. It bears no comparison with the available well-known and widely used methods of photon therapy, including photonic- gadolinium using gadolinium agents. This example is noteworthy only because it describes the general state of affairs in the NCT.

## **A.4 IRRADIATION FACILITY OPERATION AND MANAGEMENT**

Aside from the technical aspects of NCT, there are a large number of reactor management and operations factors that must be considered. Since they can have a significant impact on the facility, they need to be carefully considered by institutions which are thinking of entering this field.

### **A4.1 Operation of the facility**

#### **A4.1.1 Reliability**

A reactor facility that is being used for NCT must have a high degree of reliability. Long term reliability is needed to enable patients to be scheduled without fear of postponement or cancellation. In addition, it is clearly important to avoid potential interruptions during patient treatment because of reactor difficulties.

#### **A4.1.2 Availability**

Many research reactors are under-utilized, and availability may not be a problem. However, facilities which have tended to become involved with NCT are those which are generally more pro-active and have a variety of other missions. NCT requires a significant amount of reactor time, not just for the therapy, but also for such things as the necessary design work, licensing, facility modifications, testing, and calibrations.

#### **A4.1.3 Continuous versus intermittent operations**

There are a number of options to minimize the time that a reactor is shut down for each NCT therapy run. One of these is to have a simulator room for patient set up (discussed later). An alternative is to provide shutters with sufficient shielding to access the NCT therapy facility at full power operation without excessive personnel exposure.

#### **A4.1.4 Personnel at the NCT facility**

There are generally three groups of people involved at the irradiation facility site. These are the reactor operations staff, the NCT operations staff, and the medical staff. This section will briefly discuss the staff needed and some of their key responsibilities.

Tasks needing staffing at the facility include:

1. NCT facility design, modification and testing;
2. Reactor operations;
3. NCT facility preparation;
4. Dosimetry analysis of the beam;
5. Standard health physics work involving the treatment facility and the personnel involved;
6. Analytical computational work associated with facility design, beam and phantom dosimetry;
7. Medical Physics
8. Medical care including all appropriate specialties
9. Drug preparation;
10. Evaluation of the boron concentration in the patient;
11. Patient preparation and positioning;
12. Supervision of the patient status.

## **A.5 NCT RADIOTHERAPY INFRASTRUCTURE**

For the NCT facility, at least the following infrastructure requirements are needed:

### **A.5.1 Patient treatment room**

The patient treatment area should be a closed, shielded room which can meet applicable standards for medical facilities, including temperature control, ventilation, and aseptic conditions. It may be necessary to check that the electrical installations satisfy both medical and reactor standards. The room will need to be supplied with: adequate communication devices such as TV cameras, an intercom and microphone; a therapy table or chair constructed of non-activating material. This room also serves as a barrier to prevent radiation from affecting medical and reactor operations personnel during treatment sessions. The treatment room must be large enough to accommodate the patient gurney aligned at any angle from  $-90^{\circ}$  to  $+90^{\circ}$  with respect to the emerging (horizontal) epithermal beam. Appropriate shielding need to be designed and constructed to achieve basic safety standards. Such shielding may weigh many tons and requires consideration early in the design phase and may be very difficult to accommodate at an existing reactor facility. Space and floor loading problems may be exacerbated should a heavy beam shutter be required. Access to the room should consider ease of patient entrance and quick access for medical staff in case of patient emergency. Any equipment placed near the beam, such as the patient gurney, or beam alignment and monitoring equipment, should also be covered with neutron absorbing material to inhibit  $^{26}$  neutron activation of these items. Other items, such as pillows, cushions, and restraints, should be tested for susceptibility to neutron activation before being used with a patient.

### **A.5.2 Medical staff requirements**

The medical staff associated with the work will have requirements such as office space and storage space for medical equipment and supplies.

### **A.5.3 Personal dosimetry**

All NCT staff must be equipped with personal dosimeters to satisfy radiological protection requirements for both nuclear and medical regulations.

### **A.5.4 On-line-beam monitoring system**

An on-line-beam monitoring system is required to detect any changes in the beam parameters during treatment. Such a system must be integrated into a fully automated beam shut-off system (either beam shutter or reactor scram).

### **A.5.5 Blood preparation concentration measurement system**

Fast and accurate preparation concentration measurements in patient blood during treatment is absolutely essential for the NCT facility. This usually means a prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) system or an ICP system.

## **A.6 NON-TECHNICAL CONSIDERATIONS**

### **A.6.1 Public acceptance**

As with any reactor, public acceptance is an issue that must be considered when converting a nuclear reactor for NCT or for building a new reactor for NCT. The use of the reactor for NCT could be used as an argument for acceptance of this reactor as a medical treatment facility. There are also ethical issues associated with NCT. In particular, NCT treatment involves the irradiation of human subjects. This is also true of other therapeutic procedures such as nuclear medicine, gamma therapy, and brachytherapy. What is different about NCT is that it involves irradiation by neutrons which is an unfamiliar subject to the public. The public tends to be more accepting of radiation therapy than of nuclear reactors in general. Gaining public acceptance is not an easy task, because often public perception of nuclear matters is based on personal feelings rather than scientific facts. Care must be taken to help people understand that if benefits of a reactor facility for NCT are demonstrated these should outweigh the perceived disadvantages of a reactor facility.

### **A.6.2 Ethical issues**

The acceptance and registration of a treatment protocol must be achieved before any medical study can commence. The more this proposed treatment deviates from standard clinical practice, the more safeguards will be mandatory to ensure the freedom of choice for the patient and full disclosure of all known or potential risks entailed in the treatment and its late morbidity. The time required to formulate such a protocol and receive approval may be long — of the order of a year. In some countries, on the basis of the available evidence, this may not be accepted at all. Another ethical issue involves the use of animals in NCT research. Again, while some are opposed to such research, the biological variability of mammalian tissue to NCT cannot be determined from physical dosimetry or cell culture studies

### **A.6.3 Economics**

Cost is a very important factor in developing and operating an NCT facility. Conversion of an existing reactor facility could cost from a few hundred thousand to several million dollars, depending on the extent of modification, availability of materials, and design capability. Constructing a new nuclear reactor specifically designed for NCT would likely cost at least twice as much as a conversion (several \$US million to tens of millions). Operating costs for an NCT facility would exceed those of a typical research reactor. All the normal costs of operating a reactor (personnel, supplies, and maintenance) are involved plus costs specifically associated with the NCT facility. Beyond the initial capital costs, operating costs for the NCT facility could easily be several tens of thousand dollars per patient.

### **A.6.4 Licensing**

A reactor will require special licensing and certification to perform NCT. Specifically the reactor license, which is governed by the appropriate regulatory agency, will have to include NCT as a major use of the facility. For a new reactor facility siting approval is an important factor to consider as part of the licensing process. In addition, permission will have to be obtained from the appropriate health authority to perform NCT on human patients.

### **A.6.5 Liability**

Medical liability issues are another major factor with which most research reactors do not normally have to deal. Because of the treatment of human subjects, an NCT facility will have to deal with the same liability issues as any other medical facility.

### **A.6.6 Administration approval and support**

The approval and support of the upper administration of the reactor facility's organization is crucial for a successful NCT program. Without this continued approval and support, the NCT facility is in jeopardy of its existence. Administrative support ensures that financial and liability issues do not become an obstacle to continued NCT treatment.

## CONCLUSION

In recent decades, the field of nuclear medicine, using neutrons, is developing rapidly. This is due to the fact that traditional methods of radiation therapy of cancer patients by about 20% are ineffective. An alternative for these patients can become neutron therapy that uses beams of fast, epithermal, thermal and ultracold neutrons. This minimizes the possibility of radiation damage to surrounding organs and tissues, which is especially important in the treatment of deep-seated tumors. Perhaps NCT technology using ultracold neutrons will be a new stage in the development of cell NCT is more effective than a traditional one.

Thus, modern technologies using neutron therapy are among the most effective and promising methods for treating malignant tumors and various tumors. Therefore, the creation of new therapeutic neutron sources, the reorientation of the old plant to the problems of neutron therapy, development and organization of serial production of pharmaceutical compounds characterized by high functional efficiency of clinical and radiation safety, the creation of databases for medical research and treatment is an urgent task that has enormous medical and social importance.

## REFERENCES

1. AGOSTEO, S., et. al. Design Of Neutron Beams For Boron Neutron Capture Therapy In A Fast Reactor (Annex 5).
2. JUN, B.J., LEE, B.C., Suggestion for an NCT Reactor in the Hospital (Annex 5).
3. <http://www.webelements.narod.ru/elements/Li.htm>
4. Sheino I. N. // Proc. of the 12th Intern. Congress on Neutron Capture Therapy, Japan, 2006. P. 531-534.
5. Cerullo N., Bufalino D., Daquino G. // Proc. of the 13<sup>th</sup> ICNCT, Italy, 2008. P.541.