

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии
Кафедра Физико-энергетические установки

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Измерение энергетического спектра нейтронов терапевтического канала циклотрона

УДК 621.384.633:539.125.5.08

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Б	Петров Илья Сергеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер ОРБ ФТИ	Черепнев М.С.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и
ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Меньшикова Е.В.	к. ф. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ ФТИ	Вагнер А.Р.	к.ф.-м.н., доцент		

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Общекультурные компетенции	
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Профессиональные компетенции	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт физико-технический

Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Кафедра прикладная физика

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

____ Вагнер А.Р.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А3Б	Петрову Илье Сергеевичу

Тема работы:

Измерение энергетического спектра нейтронов терапевтического канала циклотрона

Утверждена приказом директора (дата, номер)

31.01.2017. №545,

Срок сдачи студентом выполненной работы:

05.06.2017

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Оценка энергетического распределения нейтронной компоненты излучения на циклотроне с помощью нейтронной активации на гамма-спектрометре в диапазоне энергий нейтронов от 0 до 20 Мэв.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Анализ литературы по физике процесса и системам детектирования. 2. Подбор материалов для нейтронной активации. 3. Проектировка системы. 4. Постановка эксперимента. 5. Обсуждение, выводы.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Екатерина Валентиновна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер ОРБ ФТИ	Черепнев Максим Святославович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АЗБ	Петров Илья Сергеевич		

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки Ядерная физика и технологии
Кафедра Прикладная физика
Период выполнения Весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения бакалаврской работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.17	Составление и утверждение технического задания	7
03.03.17	Подбор и изучение материалов по теме	10
15.03.17	Выбор направления исследования	5
06.04.17	Проведение эксперимента	45
15.05.17	Анализ и описание результатов	30
20.05.17	Подготовка к защите ВКР	7

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер ОРБ ФТИ	Черепнев М.С.			

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ ФТИ	Вагнер А.Р.	к.ф. - м.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А3Б	Петрову Илье Сергеевичу

Институт	ФТИ	Кафедра	ПФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	SWOT-анализ

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Альтернативы проведения НИ</i>
4. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. Менеджмента ИСГТ	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к.ф.н.		16.05.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Б	Петров Илья Сергеевич		16.05.2016

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А3Б	Петрову Илье Сергеевичу

Институт	ФТИ	Кафедра	ПФ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– вредных проявлений факторов производственной среды (шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	– электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – радиационная безопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Б	Петров И.С.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 74 с., 6 рис., 25 табл., 10 источников.

Ключевые слова: нейтронно – активационный анализ, циклотрон, энергетический спектр, нейтрон, поток.

Объектом исследования является поток нейтронов терапевтического канала циклотрона Р7М.

Цель работы: Оценить энергетическое распределение нейтронной компоненты излучения на циклотроне с помощью нейтронной активации на гамма-спектрометре в диапазоне энергий нейтронов от 0 до 15 МэВ.

В процессе исследования проводился обзор литературы по нейтронно-активационному анализу, подбор материалов для пороговых детекторов, эксперимент по облучению детекторов на циклотроне, расчет интегральных плотностей потоков нейтронов в канале циклотрона. Также проводился расчет финансовой составляющей работы.

В результате исследования были получены интегральные плотности потоков нейтронов.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: циклотрон типа Р7М с энергиями нейтронов до 15 МэВ и средней энергией нейтронов 8 МэВ.

Область применения: ядерная медицина.

Содержание

Введение.....	13
1 Обзор литературы	14
1.1 Получение быстрых нейтронов для медицинских целей.....	14
1.2 Основы теории циклотрона.....	14
1.2.1 Описание физических принципов работы циклотрона.....	14
1.2.2 Циклотроны в современном мире	16
1.3 Взаимодействие нейтронов с веществом.....	17
1.4 Методы регистрации нейтронов.....	19
1.4.1 Метод наведенной активности.	19
1.4.2 Борный метод.....	20
1.4.3 Регистрация с помощью делительных камер.....	21
1.4.5 Метод ядер отдачи	21
1.4.6 Метод пороговых детекторов	22
2. Приборы, методы и материалы исследования	26
2.1 Циклотрон типа P7M	26
2.2 Спектрометр Canberra GC2018	27
3. Экспериментальная часть.....	30
3.1 Анализ низкоэнергетической компоненты спектра нейтронов	30
3.2 Результаты измерений потока быстрых нейтронов.....	30
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	33
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	33
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	34
4.1.2 Анализ конкурирующих решений.....	34
4.1.3 SWOT-анализ.....	35
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	38

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	38
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	39
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	41
4.2.4 Расчет материальных затрат	43
4.2.5 Затраты на специальное оборудование для научной работы	46
4.2.6 Основная заработная плата исполнителей темы.....	46
4.2.7 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	48
4.2.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта ...	49
4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	50
5. Социальная ответственность	54
5.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов	55
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	57
5.2.1 Организационные мероприятия.....	57
5.2.2 Технические мероприятия.....	58
5.2.3 Условия безопасной работы.....	60
5.3 Радиационная безопасность	62
5.3.1 Общие положения	63
5.3.2 Работа на терапевтическом канале циклотрона.....	64
5.3.3 Работа с облучаемыми детекторами	67
5.4 Электробезопасность	69
5.5 Пожарная и взрывная безопасность	70
Заключение	73
Список использованных источников	74

Введение

За последние годы в клинической онкологии стало актуальным применение корпускулярных излучений для лечения злокачественных опухолей. Широким фронтом используются клинические исследования эффективности применения протонов, быстрых нейтронов, пи-мезонов и других частиц.

В настоящее время нейтронная терапия применяется в двадцати радиологических центрах экономически развитых стран мира. По современным представлениям около 15% больных с 3-4 стадией злокачественных опухолей (что для России 40 000 – 50 000 человек в год) нуждаются в лучевой терапии с использованием нейтронов.

Для дистанционной терапии необходимы довольно значительные потоки быстрых нейтронов, способные создавать в ткани уровни доз не менее 0,1 Гр/мин при расстоянии источник – облучаемая поверхность 1м. Подобная мощность дозы может быть получена с помощью циклотронов и нейтронных генераторов.[1]

Существует большое число ядерных реакций, в которых на циклотроне могут быть получены быстрые нейтроны. Преимущественно для этих целей используют реакцию ${}^9\text{Be} (d,n) {}^{10}\text{B}$, дающую наибольший выход нейтронов. Средняя энергия полученных нейтронов составляет при этом около 42% энергии падающих дейтронов.

В циклотронах, предназначенных для лучевой терапии, находит применение и реакция ${}^9\text{Be} (p,n) {}^9\text{B}$. При бомбардировке бериллиевой мишени протонами получаемый поток нейтронов имеет более широкое угловое распределение, чем при использовании дейтронов.

Циклотрон ТПУ типа Р7М в настоящее время используется для наработки радиофармпрепаратов и лечения онкобольных. Для более эффективного лечения онкологических заболеваний необходимо уточнить параметры нейтронного поля.

1 Обзор литературы

1.1 Получение быстрых нейтронов для медицинских целей

Для дистанционной терапии необходимы значительные потоки быстрых нейтронов, способные создавать в тканях урони доз не менее 0,1 Гр/мин при расстоянии источник-облучаемая поверхность 1 м. Источниками таких потоков могут быть циклотроны.

Существует большое число ядерных реакций, в которых на циклотроне могут быть получены быстрые нейтроны. Преимущественно для этих целей используют реакцию ${}^9\text{Be} (d,n) {}^{10}\text{B}$, дающую наибольший выход нейтронов. Средняя энергия полученных нейтронов составляет при этом около 42% энергии падающих дейтронов.

В циклотронах, предназначенных для лучевой терапии, находит применение и реакция ${}^9\text{Be} (p,n) {}^9\text{B}$. При бомбардировке бериллиевой мишени протонами получаемых поток нейтронов имеет более широкое угловое распределение, чем при использовании дейтронов.

1.2 Основы теории циклотрона

1.2.1 Описание физических принципов работы циклотрона

Циклотрон - резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов), в котором частота ускоряющего электрического поля и ведущее магнитное поле постоянны во времени. В циклотроне ускорение пучка частиц происходит путем многократного сообщения ему небольших порций энергии. Для этого с помощью сильного магнитного поля пучок заставляют двигаться по спиральной траектории и много раз проходить один и тот же ускоряющий промежуток. Поскольку энергия частиц возрастает с каждым оборотом, они двигаются в циклотроне по раскручивающейся

спирали, периодически пересекая несколько ускоряющих промежутков (в подавляющем числе циклотронов используют один ускоряющий промежуток, который частицы проходят дважды за один оборот).[2]

Циклотрон состоит из двух полых полукруглых металлических электродов, называемых дуантами (полыми D-образными электродами). Пучок экранируется ими от действия электрического поля в тот полупериод, когда оно действует замедляющим образом. Оба дуанта располагаются внутри вакуумной камеры и разделены между собой узким зазором, в котором создается ускоряющая разность потенциалов. Вакуумная камера с дуантами располагается между полюсами большого электромагнита. Вблизи от центра дуантов располагается инжектор - источник заряженных частиц. В циклотроне ускоряют тяжелые заряженные частицы - протоны и ионы. Протоны и тяжелые ионы движутся по раскручивающейся спирали все возрастающего радиуса. При каждом обороте по орбите пучок дважды проходит через зазор между дуантами, где на него действует высокочастотное электрическое поле. Электроны ускорять в циклотроне невозможно, поскольку релятивистский эффект необходимо учитывать для них начиная с десятков кэВ, а он приводит к постепенному выходу пучка частиц из режима ускорения.

Упрощенная схема циклотрона представлена на рисунке 1, где 1 - электромагнит, 2 - обмотка электромагнита, 3- вакуумная камера, 4 - источник ионов, 5 - дуанты, 6 - ВЧ система ускоряющего промежутка, 7 - пучок ионов, 8 - система вывода пучка.

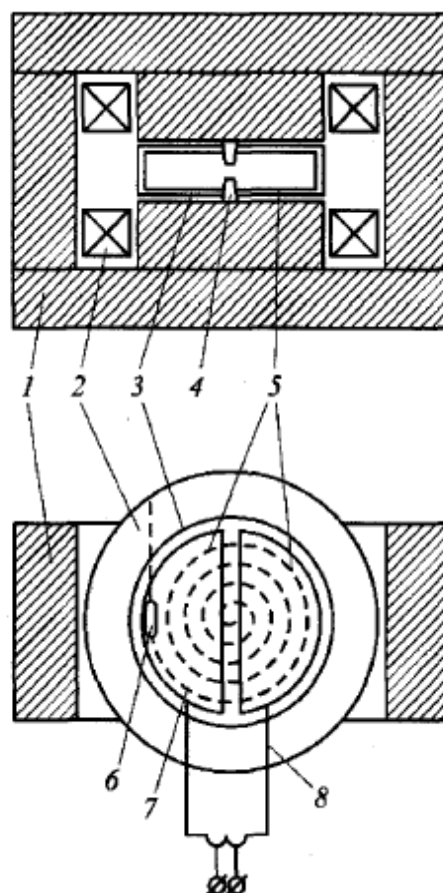


Рисунок 1 – Упрощенная схема циклотрона

1.2.2 Циклотроны в современном мире

В настоящее время циклотроны не представляют интереса в области фундаментальных исследований в ядерной физике из-за появления более современных ускорителей. Однако они занимают нишу в области наработки радиофармпрепаратов и ядерной медицинской физике.

В таблице 1 приводится характеристика циклотронов, использующихся в разных странах в медицинских целях для нейтронной терапии [1].

Таблица 1 – Характеристика циклотронов для терапии нейтронами

Страна, местонахождение	Характеристика типа частиц, энергия
Великобритания	
Эдинбург	15 МэВ, d
Хаммерсмитский госпиталь	16 МэВ, d
Европейские страны	
Эссен	14,3 МэВ, d
Лувен	50 МэВ, d
Дрезден	13,5 МэВ, d
Япония	
Токио	14 МэВ, d
Чиба	30 МэВ, d
США	
Вашингтон	35 МэВ, d
Кливленд	25 МэВ, d
Сиэтл	15 МэВ, p
Чикаго	8 МэВ, d
Калифорния	45 эВ, p

1.3 Взаимодействие нейтронов с веществом

Нейтроны, не имеют электрического заряда, поэтому при движении в среде не взаимодействуют с электронными оболочками атомов среды. Нейтроны, непосредственно не ионизируют атомы и молекулы, как заряженные частицы. В следствие чего нейтроны обнаруживают по вторичным эффектам, возникающим при взаимодействии их с ядрами. При столкновениях с атомными ядрами они могут выбивать из них заряженные частицы, которые ионизируют и возбуждают атомы среды. В результате

соударения нейтронов с ядрами вещества природа последних не изменяется, а сами нейтроны рассеиваются на атомных ядрах. При этом следует рассматривать упругое и неупругое рассеяния. При втором виде взаимодействия изменяется природа соударяющихся частиц. Происходят ядерные реакции типа (n, α) , (n, p) , (n, γ) , $(n, 2n)$ и т.д., и наблюдается деление тяжелых ядер.

Для нейтронов отсутствует кулоновский барьер, поэтому реакции под действием этих частиц представляют наиболее обширный круг ядерных реакций. Результат ядерного взаимодействия нейтрона с ядром существенным образом зависит от его энергии. Используют следующую классификацию нейтронов по энергиям:

Тепловые нейтроны, кинетическая энергия тепловых нейтронов определяется температурой вещества, с которым нейтроны взаимодействуют, т.е. $T_n \sim kT_0$. При комнатной температуре $T_0 \approx 300 \text{ K}$

$T_n \approx 0,025 \text{ эВ}$, т.е. очень маленькая величина. Длина волны де Бройля тепловых нейтронов $\lambda > 10^{-8} \text{ см}$.

Медленные нейтроны – это нейтроны с кинетической энергией $T_n \sim \text{десятки кэВ}$; $\lambda > 10^{-8} \text{ см}$.

Нейтроны промежуточных энергий; $100 \text{ кэВ} \leq T_n \leq 1 \text{ МэВ}$.

Быстрые нейтроны, $T_n \geq 1 \text{ МэВ}$.

Под действием нейтронов идут следующие ядерные реакции:

1) *Упругое рассеяние*. В этой реакции внутреннее состояние ядра не изменяется, происходит изменение только кинетических энергий ядра и нейтрона. Реакция протекает при всех энергиях нейтронов. Упругое рассеяние тепловых нейтронов имеет хаотический характер и сопровождается обменом кинетической энергией теплового движения $\sim kT_0$ между нейтроном и ядром;

2) *Неупругое рассеяние*. При неупругом рассеянии происходит изменение внутреннего состояния ядра – оно образуется в возбужденном состоянии. Реакция является пороговой и идет на быстрых нейтронах;

3) *Реакция радиационного захвата.* В этой реакции нейтрон захватывается ядром, а образовавшееся возбужденное составное ядро испускает жёсткое электромагнитное излучение. С наибольшей вероятностью реакция идёт на тепловых и медленных нейтронах;

4) *Реакции с образованием заряженных частиц и множественного числа частиц.* Такие реакции за редким исключением идут на быстрых нейтронах;

5) *Реакция деления тяжелых ядер.* В этой реакции происходит поглощение нейтрона ядром, после чего образовавшееся составное ядро делится на два ядра из середины таблицы Менделеева. Энергии нейтронов, при которых протекает реакция деления, зависят от типа делящегося изотопа. Например, U^{235} с наибольшей вероятностью делится под действием тепловых нейтронов, а деление U^{238} возможно только на быстрых нейтронах.

1.4 Методы регистрации нейтронов

1.4.1 Метод наведенной активности.

При образовании и поглощении нейтронов часто образуются радиоактивные ядра, которые распадаются согласно общим законам радиоактивного распада. Измеряя активность полученных таким образом источников, можно определить величину потока падающих нейтронов

Если на образец падает Φ нейтронов в секунду на 1 см^2 , а в слое вещества содержится n атомов/ см^2 , то при эффективном сечении захвата, равном σ за одну секунду, должно образоваться $\Phi n \sigma$ активных атомов. Одновременно будет происходить распад этих атомов, и за время dt число распавшихся атомов равно $\lambda N dt$.

Следовательно, активность препарата

$$\frac{dN}{dt} = n\Phi\sigma - \lambda N, \quad (1)$$

Решение этого уравнения, как известно, приводит к экспоненциальному закону, по которому при достаточно большом времени t

$$\frac{dN}{dt} \rightarrow 0$$

т.е. увеличение числа активных атомов полностью компенсируется распадом. Стационарное число активных атомов станет равным числу атомов, образованных за среднее время жизни τ

$$N_0 = \frac{\Phi n \sigma}{\lambda} = n \Phi \sigma \tau. \quad (2)$$

Величина λN_0 называется активацией насыщения. При $t \ll \tau$ можно считать

$$N = n \Phi \sigma t. \quad (3)$$

В общем случае интегрируя уравнение, получим

$$N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}). \quad (4)$$

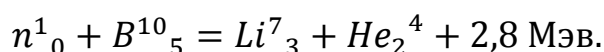
После облучения необходимо время для транспортировки препарата к детектору, или проба специально выдерживается для распада мешающих анализу короткоживущих продуктов ядерных реакций. В результате распада активность уменьшается:

$$A = \sigma \Phi N_x \times [1 - \text{Exp}[-\lambda t_{\text{обл}}]] \times \text{Exp}[-\lambda t_{\text{ост}}]. \quad (5)$$

Здесь σ - сечение реакции, $t_{\text{обл}}$ – время облучения нейтронами, $t_{\text{ост}}$ – время остывания (от облучения до начала измерений), N_x – количество ядер мишени, λ – вероятность распада продукта реакции.

1.4.2 Борный метод

Этот метод является одним из важнейших методов регистрации нейтронов. Он основан на свойствах бора поглощать нейтроны с энергией от тепловых до десятков кэВ. При этом идет реакция



Родившиеся α -частицы сильно ионизируют вещество и могут быть зарегистрированы приборами. Для этого можно использовать почти все имеющиеся детекторы, вводя в них соответствующим способом бор:

- ионизационные камеры наполняются газом BF_3 ;
- стенки счетчиков Гейгера покрываются тонким слоем B_5^{10} ;
- в желатину фотоэмульсии добавляется бор;
- в сцинтиллятор добавляется бор.

Так как эффективные сечения реакции при различных энергиях нейтронов известны, то, пользуясь борным методом, можно определять энергии нейтронов, измерять плотность нейтронов и др.

1.4.3 Регистрация с помощью делительных камер

Медленные нейтроны вызывают деление U^{235} . Осколки от деления имеют энергию порядка 100 Мэв, большую массу и малый пробег в веществе. Кроме того, они сильно ионизированы. Это позволяет использовать для регистрации нейтронов обычную ионизационную камеру, один электрод которой покрыт окисью урана, обогащенной U^{235} . Такие камеры получили название делительных.

Для детектирования быстрых нейтронов используют делительную камеру, стенки которой покрыты U^{235} , делящимся под воздействием нейтронов.

1.4.5 Метод ядер отдачи

Основным методом, позволяющим не только зарегистрировать нейтрон большой энергии, но и определить его импульс, является метод ядер отдачи (обычно – протонов отдачи).

Нейтрон, сталкиваясь с протоном, передает ему часть своей энергии и импульса. Пользуясь законами сохранения энергии и импульса при упругом ударе, можно определить как энергию падающего нейтрона, так и угол вылета рассеянного нейтрона.

Для эффективного использования этого метода в различные детекторы вводят водородосодержащие вещества:

- пропорциональные счетчики наполняют водородом или помещают у одного конца счетчика парафин;
- камеру Вильсона наполняют водородом;
- фотопластинки не требуют специальной обработки благодаря тому, что водород уже входит в состав самой эмульсии;
- органический сцинтиллятор также содержит много водорода и поэтому может быть использован для регистрации протонов отдачи.

Существуют и другие методы детектирования нейтронов. Из сказанного выше уже видно, что регистрировать нейтроны труднее, чем заряженные частицы; в то же время медленные нейтроны проще регистрировать, чем быстрые.

1.4.6 Метод пороговых детекторов

Одна из разновидностей метода наведенной активности – метод пороговых детекторов, при котором проводится исследование пороговых реакций типа (n, p) , $(n, 2n)$, (n, α) , и т.д. Основная идея заключается в зависимости сечения реакции от энергии нейтронов, а именно: эти реакции не протекают на нейтронах с энергиями ниже пороговой. Сечение σ , имеет сложную зависимость от энергии нейтронов, поэтому в простейшем случае, сечение реакции заменяется одноступенчатой функцией, которая равна нулю при энергиях, меньших эффективного порога и постоянна при больших энергиях. Юз впервые применил метод эффективных пороговых сечений. В

качестве он предложил принимать максимальное значение сечения реакции [3]. На рисунке 2 представлена зависимость сечения реакции (n,2n) на Au^{197} от энергии нейтронов. Порог реакции – 8 МэВ. В этой реакции испускается гамма квант с энергией 355 кэВ. Период полураспада 6 дней. Таким образом данная реакция может быть зафиксирована на гамма – спектрометре.

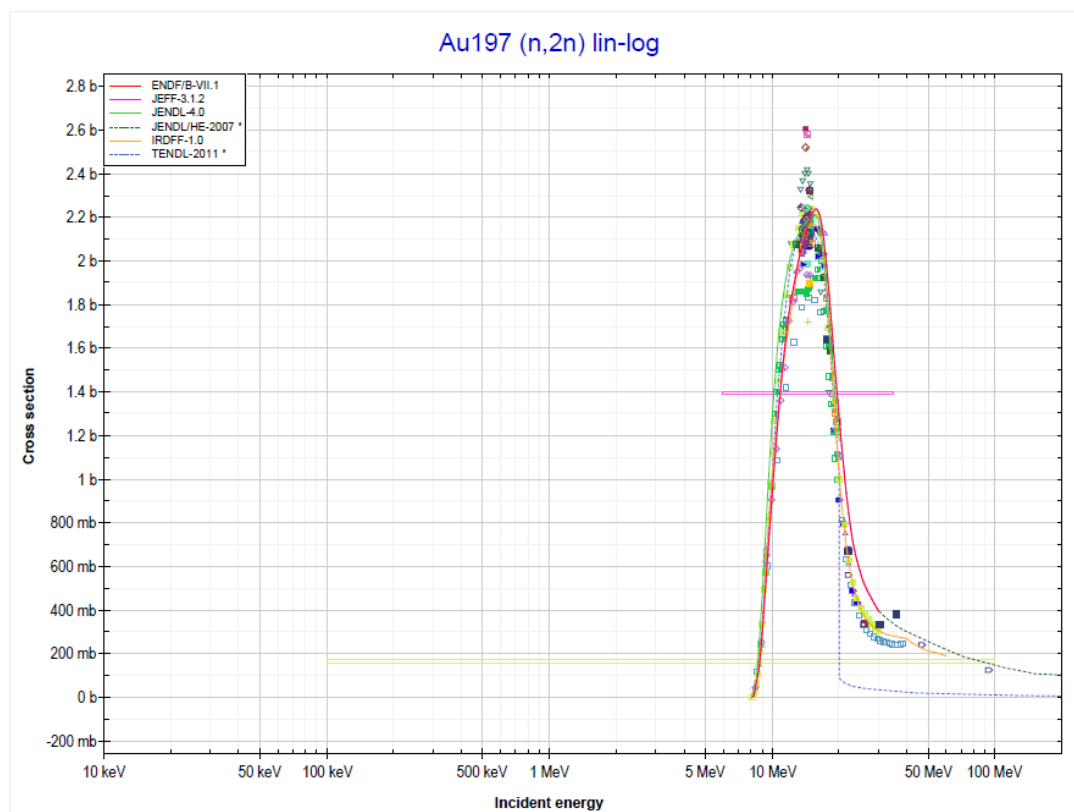


Рисунок 2 – Зависимость сечения реакции на золоте (n,2n) от энергии нейтронов

Для анализа потоков быстрых нейтронов методом пороговых детекторов широкой популярностью пользуются материалы, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Мишени для метода пороговых детекторов.

Материал	Тип реакции	Эффективный порог реакции ($E_{эфф}$), МэВ	Сечение активации, мб	Период полураспада продукта реакции	Характерные гамма-кванты реакции, кэВ
Fe ⁵⁴	(n, p)	1	600	312 сут	835 (100%)
Al ²⁷	(n, p)	2	100	9,46 мин	1014 (30%) 844 (70%)
Al ²⁷	(n, α)	3,5	130	15 ч	1370(100%) 2754 (100%)
Mg ²⁴	(n, p)	5	200	15 ч	2754 (100%) 1368 (100%)
Nb ⁹³	(n, 2n)	9	1400	10,2 сут	934,5 (99%)
Co ⁵⁹	(n, 2n)	10,6	1000	70,8 сут	811 (99%)
Cu ⁶³	(n, 2n)	11	700	9,76 мин	511 (100 %)
Mn ⁵⁵	(n, 2n)	11,6	850	303 сут	835 (100%)
Ni ⁵⁸	(n, 2n)	12,6	80	36 ч	1377 (86%) 511 (92%)
Cr ⁵⁰	(n,2n)	13,5	120	41,9 мин	511 (190%)

Поскольку реакции, представленные в таблице 4 пороговые, то используя формулу (5), можно определить интегральную плотность потока нейтронов в диапазоне от $E_{эфф}$ до 15 МэВ:

$$\Phi(n \in [E_{эфф}, 15 \text{ МэВ}]) = \frac{A \times \text{Exp}[\lambda t_{\text{ост}}]}{\sigma \times N_x \times [1 - \text{Exp}[-\lambda t_{\text{обл}}]]}. \quad (6)$$

Таким образом, используя несколько детекторов с различными пороговыми энергиями, можно получить потоки нейтронов в соответствующем энергетическом диапазоне от $E_{эфф}$ до 15 МэВ. Далее,

комбинируя результаты, возможно восстановить интегральный спектр быстрых нейтронов.

2. Приборы, методы и материалы исследования

Поскольку нейтроны почти не взаимодействуют с электронами, они непосредственно производят очень слабую ионизацию – создают всего лишь одну пару ионов на одном метре пути, в то время, как протоны с такой же энергией создают около одного миллиона пар на метре того же вещества.

Таким образом, нейтроны нельзя обнаружить обычными приборами, основанными на ионизирующей способности заряженных частиц. Приходится использовать вторичные эффекты.

Регистрация нейтронов основана на двух принципах: во-первых, на наблюдении заряженных частиц, возникающих при ядерном взаимодействии нейтронов с веществом, вводимым в прибор, и, во-вторых, на использовании явления отдачи ядер легких элементов при столкновении их с нейтронами. Выбор метода зависит от энергии нейтрона: для медленных нейтронов пользуются методом ядерных взаимодействий, тогда как для быстрых – методом ядер отдачи.

2.1 Циклотрон типа Р7М

Эксперимент проводился на терапевтическом канале циклотрона типа Р7М. Ниже представлены его основные характеристики.

Основная информация по терапевтическому каналу циклотрона Р7М:

- Нейтронный поток получают посредством облучения бериллиевой мишени (Ø40 x 2 мм) пучком дейтронов с энергией 13,6 МэВ, ускоренных в циклотроне Р7М ТПУ. Бериллиевая мишень прижата к медной пластине, которая охлаждается потоком дистиллированной воды. Перед мишенью расположен графитовый коллиматор и 4 пробника, с помощью которых пучок дейтронов фокусируют на мишень в виде пятна диаметром 30 мм.

- Мишень расположена на конце ионопровода в бетонной стене, отделяющей зал циклотрона.
- Пучок нейтронов формируется с помощью коллимирующего устройства.
- Средняя энергия нейтронов возникающих в мишени около 7 МэВ, а максимальная - 15 МэВ.

2.2 Спектрометр Canberra GC2018

В данной работе использовался германиевый гамма спектрометр Canberra.

Его основные технические характеристики представлены в таблице 3.
Таблица 3 – Основные технические характеристики гамма – спектрометра CANBERRA

Диапазон энергий регистрируемого излучения	50-3000 кэВ
Разрешение по линии 122 кэВ радионуклида Co^{57}	Не хуже 0,85 кэВ
Разрешение по линии 1332 кэВ радионуклида Co^{60}	Не хуже 1,8 кэВ
Относительная эффективность регистрации детектора	Не менее 20%
Предел относительной погрешности характеристики преобразования (интегральная нелинейность), %	Не более 0,7
Время установления рабочего режима	Не более 30 минут (без учета времени охлаждения детектора)
Питание от сети переменного тока напряжением	220 В

Питание от сети переменного тока частотой	50 Гц
Потребляемая мощность	Не более 400 ВА
Условия эксплуатации	
Температура	От 0 до +35 °С
Относительная влажность	До 80%

[6]

Для проверки наличия в спектре нейтронного канала циклотрона медленных нейтронов использовалась мишень Au^{197} . На рисунке 4 представлена зависимость сечения реакции (n,γ) на ядре Au^{197} . Из рисунка видно, что реакция преимущественно проходит на медленных нейтронах с энергиями до нескольких кэВ. В результате этой реакции образуется ядро Au^{198} , которое распадается с периодом полураспада равным 2,7 сут. При распаде испускается гамма – квант, с энергией 411 кэВ.

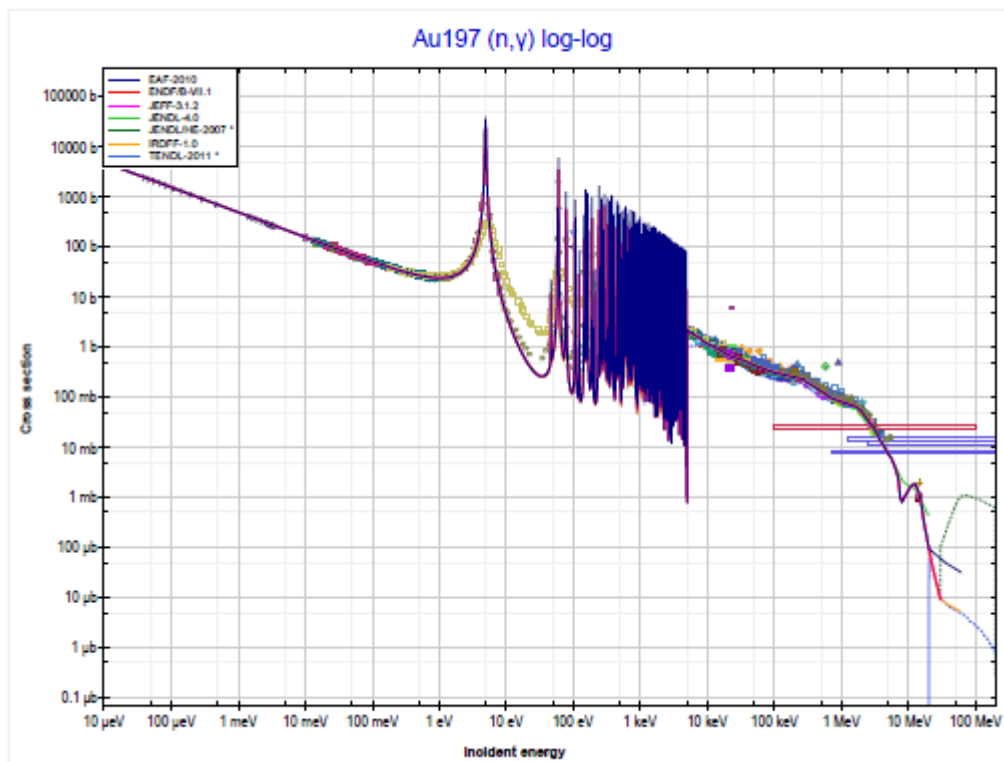


Рисунок 3 – Зависимость сечения реакции (n,γ) на ядре Au^{197}

Для оценки спектра быстрых нейтронов канала циклотрона использовался метод пороговых детекторов – один из разновидностей активационного метода.

Ввиду ограниченности ресурсов, в качестве пороговых детекторов были выбраны материалы, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Материалы для пороговых детекторов

Детектор, реакция	Сечение активации, мбн	Пороговая энергия, МэВ
$\text{Fe}^{56} (n, p)$	120	4
$\text{Al}^{27} (n,p)$	100	2
$\text{Cu}^{63} (n, 2n)$	700	11

3. Экспериментальная часть

Исходными данными работы следует считать документацию о исследуемому каналу циклотрона. Из нее следует, что в канале циклотрона нет нейтронов с энергиями, превышающими 15 МэВ.

3.1 Анализ низкоэнергетической компоненты спектра нейтронов

В ходе измерения спектра, линия 411 кэВ не была обнаружена, что указывает на тот факт, что реакция (n,γ) не протекала. Следовательно, в спектре терапевтического канала циклотрона Р7М отсутствуют медленные нейтроны с энергиями до нескольких кэВ.

3.2 Результаты измерений потока быстрых нейтронов

По итогам работы были получены данные, представленные в таблице 5, где σ – эффективное сечение, $E_{\text{пор}}$ – пороговая энергия реакции, $t_{\text{обл}}$ – время облучения нейтронами, $t_{\text{ост}}$ – время остывания (от облучения до начала измерений), λ – вероятность распада продукта реакции, A – измеренная активность, Φ – плотность потока нейтронов в канале циклотрона.

Таблица 5 – Плотности потоков нейтронов в канале циклотрона

Детектор, реакция	σ , мбн	$E_{\text{пор}}$, МэВ	$t_{\text{обл}}$, с	$t_{\text{ост}}$, с	$\lambda, \text{с}^{-1} \cdot 10^6$	A , Бк	Φ , н/(см ² ·с)
Al ²⁷ (n,p)	100	2	325	1310	1221	$(84,7 \pm 7,6) \cdot 10^5$	$(29,4 \pm 2,6) \cdot 10^{11}$
Fe ⁵⁶ (n, p)	120	4		5200	74,6	$(15,9 \pm 1,7) \cdot 10^4$	$(13,9 \pm 1,5) \cdot 10^{10}$

$\text{Cu}^{63} (n, 2n)$	700	11		1450	1183	$(30,6 \pm 3,9) \cdot 10^4$	$(14,1 \pm 1,8) \cdot 10^9$
--------------------------	-----	----	--	------	------	-----------------------------	-----------------------------

Комбинируя результаты, была проведена оценка распределения потока нейтронов по энергиям:

$$\Phi(n \in [2, 4 \text{ МэВ}]) \approx 2,8 \cdot 10^{12},$$

$$\Phi(n \in [4, 11 \text{ МэВ}]) \approx 1,3 \cdot 10^{11},$$

$$\Phi(n \in [11, 15 \text{ МэВ}]) \approx 1,4 \cdot 10^{10}.$$

После была построена гистограмма, отображающая зависимость интегральной плотности потока быстрых нейтронов в терапевтическом канале циклотрона Р7М (рисунок 4).

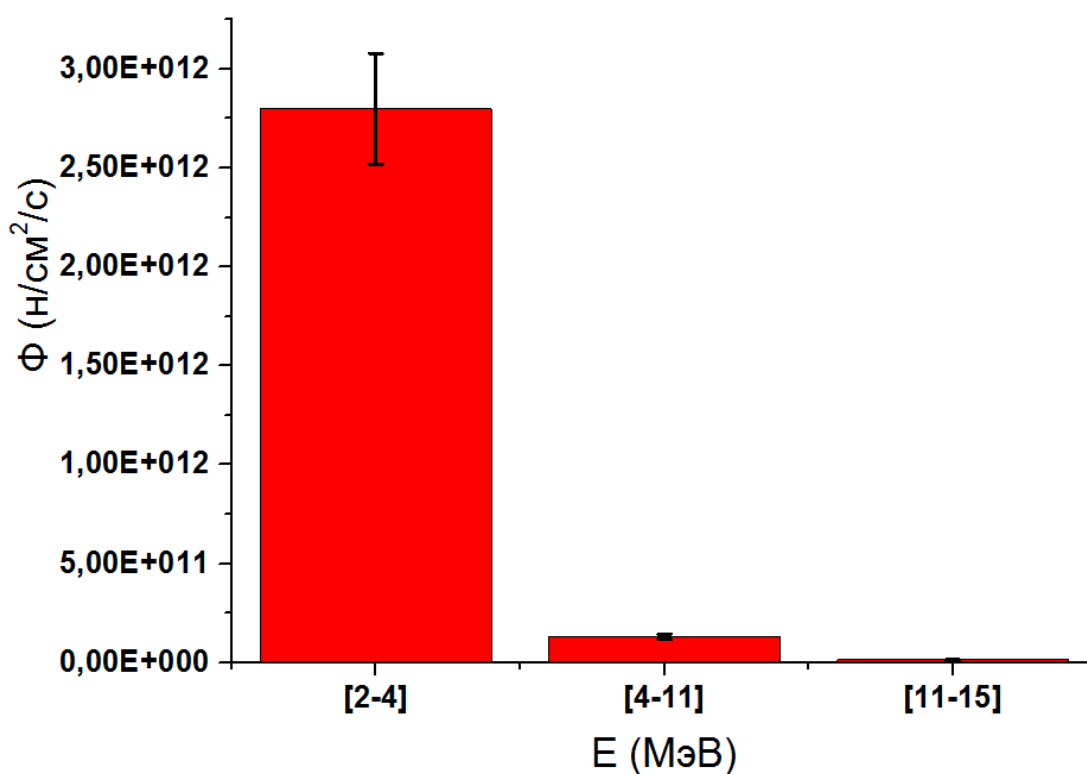


Рисунок 4 – Гистограмма плотности потока нейтронов

Или в логарифмическом масштабе (рис. 5)

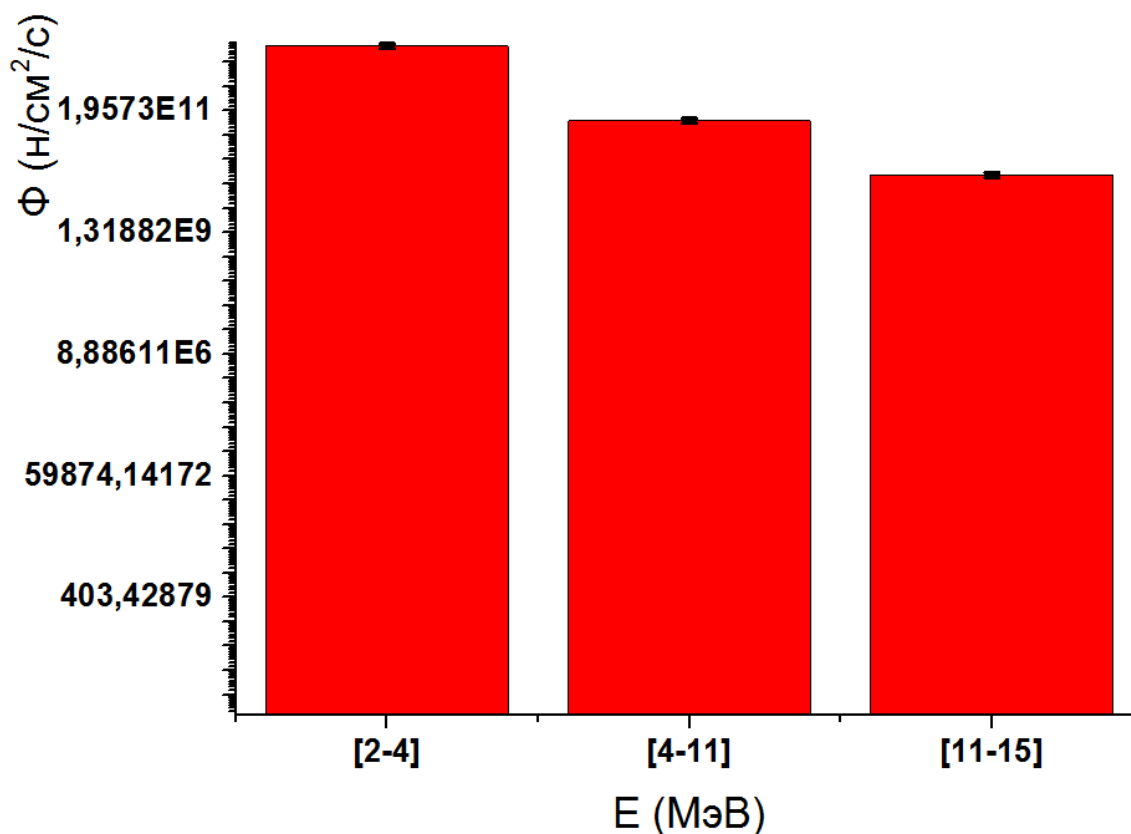


Рисунок 5 – Гистограмма плотности потока нейтронов в логарифмическом масштабе

Из гистограмм видно, что преобладающая часть быстрых нейтронов принадлежит диапазону от 2 до 4 МэВ. Существенно меньший вклад в общий поток вносят нейтроны больших энергий.

Заключение

В ходе работы был сделан анализ литературы по способам детектирования и спектрометрии нейтронов. Так же в ходе обзора литературы были найдены распространенные материалы для нейтронной активации. Из них были отобраны доступные материалы и сконструированы детекторы для активации на циклотроне Р7М. В результате эксперимента было обнаружено отсутствие медленных нейтронов в терапевтическом канале циклотрона Р7М, преобладание нейтронного потока в диапазоне энергий от 2 до 4 МэВ. Для увеличения точности результатов в дальнейшем необходимо увеличить количество однородных детекторов и времена облучения.

Список использованных источников

1. Дистанционная нейтронная терапия / Б.Н. Зырянов, Л.И. Мусабаева, В.Н. Летов, В.А. Лисин. – Томск, изд-во Томского Университета – 1991. – 299 с.
2. А.П. Черняев. Ускорители в современном мире – М, изд-во Московского университета – 2012. – 365 с.
3. Экспериментальные методы нейтронных исследований / Е.А. Крамер – Агеев, В.Н. Лавренчик, В.Т. Самосадный, В.П. Протасов. – М., изд-во Энергоатомиздат – 1990. – 272 с.
4. N.Soppera. JANIS book of neutron-induced cross-sections – OECD NEA Data Bank – 2012, P. 2010.
5. И.В. Меднис. Справочные таблицы для нейтронно – активационного анализа – Рига, изд-во Зинатне – 1974. – 412 с.
6. Canberra Industries Inc. Паспорт. Гамма-спектрометр многоканальный для измерения рентгеновского и гамма-излучения CANBERRA. Зарегистрирован в Гос. реестре средств измерений РФ под № 1585-10.
7. В.П. Машкович. Защита от ионизирующих излучений. Справочник – М., изд-во Энергоатомиздат – 1995. – 496 с.
8. Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ.
9. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
10. ГОСТ Р12.1.004-85. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. Пожарная безопасность. – М. Стандартинформ, 1985. – 10с.