

Школа инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
 Отделение школы отделение ядерно-топливного цикла

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

<b>Тема работы</b> <b>Оценка радиационной безопасности при использовании малогабаритного импульсного бетатрона в НИИ Онкологии Томского НИМЦ</b>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

УДК 621.384.634.3:614.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A7A	Грушина Анастасия Сергеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Веригин Дан Александрович	к.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
<b>УК(У)-2</b>	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
<b>УК(У)-3</b>	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
<b>УК(У)-4</b>	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке
<b>УК(У)-5</b>	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
<b>УК(У)-6</b>	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
<b>УК(У)-7</b>	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
<b>УК(У)-8</b>	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
<b>ОПК(У)-2</b>	способностью 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
<b>ОПК(У)-3</b>	владением основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	способностью использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
<b>ПК(У)-2</b>	способностью проводить математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований
<b>ПК(У)-3</b>	готовностью к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов

<b>ПК(У)-4</b>	способностью использовать технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций
<b>ПК(У)-5</b>	готовностью к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок
<b>ПК(У)-6</b>	способностью использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу исходных данных для проектирования приборов и установок
<b>ПК(У)-7</b>	способностью к расчету и проектированию деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования
<b>ПК(У)-8</b>	готовностью к разработке проектной и рабочей технической документации, оформлению законченных проектно-конструкторских работ
<b>ПК(У)-9</b>	способностью к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам
<b>ПК(У)-10</b>	готовностью к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных решений при разработке установок и приборов
<b>ПК(У)-12</b>	способностью к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования
<b>ПК(У)-13</b>	способностью к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции
<b>ПК(У)-14</b>	готовностью к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем
<b>ПК(У)-15</b>	способностью к монтажу, наладке, настройке, регулировке, испытанию и сдаче в эксплуатацию оборудования и программных средств
<b>ПК(У)-17</b>	способностью 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
<b>ПК(У)-18</b>	готовностью разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, сверхвысокочастотных и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем
<b>ПК(У)-20</b>	способностью к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам

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

Школа \_\_\_\_\_ инженерная школа ядерных технологий \_\_\_\_\_  
 Направление подготовки \_\_\_\_\_ 14.03.02 Ядерная физика и технологии \_\_\_\_\_  
 Отделение школы \_\_\_\_\_ отделение ядерно-топливного цикла \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Бычков П.Н.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

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

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0A7A	Грушина Анастасия Сергеевна

Тема работы:

Оценка радиационной безопасности при использовании малогабаритного импульсного бетатрона в НИИ Онкологии Томского НИМЦ	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	03.02.2021, 34-52/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09.06.2021
------------------------------------------	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объект исследования – источник импульсного ионизирующего излучения малогабаритный бетатрон с энергией ускоренных электронов 7 МэВ, частота 320 Гц, длительность импульса излучения 5 мкс. Предмет исследования – распределение интенсивности дозовых полей ионизирующего излучения, генерируемых при работе малогабаритного бетатрона.
---------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p>	<p>Малогабаритные бетатроны – принцип работы и применение в промышленности и медицине.  Методы и средства измерения интенсивности радиационных полей импульсных источников ионизирующих излучений.  Проведение измерений интенсивности радиационных полей, генерируемых малогабаритными бетатронами ТНИМЦ НИИ Онкологии и НПЛ «Бетатронная томография крупногабаритных объектов».  Моделирование распределения интенсивности радиационных полей ионизирующего излучения, генерируемого бетатроном НПЛ «Бетатронная томография крупногабаритных объектов».  Расчет биологической защиты и мощности дозы от электронного пучка малогабаритного бетатрона НПЛ «Бетатронная томография крупногабаритных объектов».  Заключение и выводы по работе.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	<p><b>Презентация для защиты ВКР</b></p>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Гасанов М.А.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Передерин Ю.В.</p>

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>14.02.2021</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент ОЯТЦ</p>	<p>Веригин Д.А.</p>	<p>к.ф.-м.н.</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>0А7А</p>	<p>Грушина Анастасия Сергеевна</p>		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А7А	Грушина Анастасия Сергеевна

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 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>	Затраты на специальное оборудование 365000 руб. Зарботная плата исполнителей 332909 руб. Отчисления во внебюджетные фонды 100538 руб. Накладные расходы 127752 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Районный коэффициент города Томска – 1,3
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Размер отчислений во внебюджетные фонды – 30,2 %

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений. SWOT-анализ.
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НТИ.
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

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

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения НТИ
4. Бюджет НТИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

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>
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	д.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А7А	Грушина Анастасия Сергеевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А7А	Грушина Анастасия Сергеевна

<b>Институт</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

Оценка радиационной безопасности при использовании малогабаритного импульсного бетатрона в НИИ Онкологии Томского НИМЦ

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является источник импульсного ионизирующего излучения малогабаритный бетатрон с энергией ускоренных электронов 7 МэВ.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</b>	Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 30.04.2021).
<b>2. Производственная безопасность:</b> – Анализ выявленных вредных и опасных факторов – Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – параметры микроклимата; – повышенный уровень ионизирующих излучений; – вредные вещества; – вентиляция; – шум; – недостаток естественного и искусственного освещения; – электрический ток; – электромагнитные поля; – пожароопасность.
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</b>	– падение с высоты собственного роста; – удар электрическим током; – пожар.

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А7А	Грушина Анастасия Сергеевна		

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

Школа \_\_\_\_\_ инженерная школа ядерных технологий \_\_\_\_\_  
 Направление подготовки \_\_\_\_\_ 14.03.02 Ядерная физика и технологии \_\_\_\_\_  
 Уровень образования \_\_\_\_\_ бакалавриат \_\_\_\_\_  
 Отделение школы \_\_\_\_\_ отделение ядерно-топливного цикла \_\_\_\_\_  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ весенний семестр 2020 /2021 учебного года \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

бакалаврская работа
---------------------

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09.06.2021
------------------------------------------	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
14.02.2021	Формирование целей и задач ВКР, задания на ВКР, плана-графика выполнения ВКР и титульного листа пояснительной записки к ВКР	5
28.02.2021	Подготовка раздела «Введение» пояснительной записки к ВКР	5
14.03.2021	Подготовка разделов пояснительной записки к ВКР по описанию экспериментальных установок	10
31.03.2021	Подготовка разделов пояснительной записки к ВКР по описанию методов и средств измерения радиационных полей импульсных источников ионизирующего излучения	10
21.04.2021	Проверка измерительной аппаратуры и проведение тестовых измерений радиационных полей импульсных источников ионизирующего излучения	10
04.05.2021	Проведение измерений радиационных полей импульсных источников ионизирующего излучения	15
11.05.2021	Подготовка разделов пояснительной записки к ВКР по обработке и представлению результатов проведенных измерений	5
18.05.2021	Подготовка и проведение моделирования генерации ионизирующего излучения, расчет биологической защиты и мощности дозы от электронного пучка от импульсного источника ионизирующего излучения	15
25.05.2021	Представление результатов моделирования и подготовка разделов пояснительной записки к ВКР по моделированию, «Выводы», «Заключение»	10



02.06.2021	Представление итогового варианта пояснительной записки к ВКР	15
------------	--------------------------------------------------------------	----

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Веригин Д.А.	к.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 84 с., 12 рис., 29 табл., 34 источников.

Ключевые слова: бетатрон, импульсное излучение, ионизирующее излучение, дозиметр, доза, дозиметрический контроль.

Объектом исследования является источник импульсного ионизирующего излучения малогабаритный бетатрон с энергией ускоренных электронов 7 МэВ

Целью работы является оценка радиационной безопасности при использовании малогабаритного импульсного бетатрона в НИИ Онкологии Томского НИМЦ.

В процессе исследования:

- проведен литературный обзор по источникам импульсного излучения и применению бетатронов в медицине и томографии;
- проведен литературный обзор по дозиметрическим приборам, предназначенным для измерения распределения интенсивности импульсных дозовых полей излучения;
- рассмотрено распределение интенсивности дозовых полей бетатрона с энергией электронов 6 МэВ;
- проведен тестовый дозиметрический контроль на бетатроне с энергией электронов 4 МэВ;
- проведен дозиметрический контроль на бетатроне с энергией электронов 7 МэВ;
- создана модель бетатрона с энергией электронов 7 МэВ в программе «Компьютерная лаборатория».

В выпускной квалификационной работе использовались: малогабаритные импульсные бетатроны, ДКС-АТ1123, ДКС-АТ5350/1 с камерой ТМ30001-10.

В результате исследования выявлены основные особенности дозиметрии импульсного ионизирующего излучения; в ходе дозиметрического контроля не установлено превышения пределов мощности доз; рассчитана погрешность измерений; полученные в ходе компьютерного моделирования данные помогли рассчитать значение мощности дозы излучения, генерируемое электронным пучком, и толщину защиты из свинца.

Область применения: решение задач, связанных с дозиметрическим контролем установок, генерирующих импульсное ионизирующее излучение.

Практическое применение: полученные результаты будут использоваться для принятия решения о покупке нового бетатрона в ТНИМЦ НИИ Онкологии.

## Определения

Ионизирующее излучение – это поток элементарных частиц, квантов или волн электромагнитной энергии, вызывающий прямо или косвенно образование электрических зарядов при взаимодействии с веществом.

Источник ионизирующего излучения – объект, содержащий радиоактивный материал, или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение.

Импульсное ионизирующее излучение – ионизирующее излучение, в данной точке поля которого никогда не будет постоянного значения мощности дозы в интервале времени длительностью более чем 10 с.

Непрерывное излучение – это ионизирующее излучение, в данной точке поля которого будет постоянное значение мощности дозы в интервале времени длительностью больше чем 10 с, пренебрегая временем включения и выключения поля

Тормозное излучение – это коротковолновое электромагнитное (фотонное) излучение с непрерывным энергетическим спектром.

Поглощенная доза – это локальная (точечная) характеристика, равная отношению средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементе объема, к массе вещества в этом объеме.

Эквивалентная доза – это произведение поглощенной дозы в биологической ткани или органе на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения.

Эффективная доза – это защитная величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности; величина, равная сумме произведений эквивалентных доз облучения в отдельных органах и тканях человека на соответствующие коэффициенты для биологических тканей и органов.

Экспозиционная доза – отношение суммарного заряда всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, образованные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой, полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в этом объеме.

Амбиентный эквивалент дозы – это эквивалент дозы, который был бы создан в шаровом фантоме МКРЕ на глубине  $d$  (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленному и однородному.

## Содержание

Реферат .....	10
Определения .....	12
Введение.....	16
1 Бетатроны.....	18
1.1 Источник ионизирующего излучения.....	18
1.2 Бетатроны в медицине .....	19
1.3 Бетатронная томография крупногабаритных объектов .....	20
2 Методы регистрации ионизирующего излучения .....	22
3 Экспериментальная часть.....	27
3.1 Бетатрон с энергией электронов 6 МэВ.....	27
3.2 Бетатрон с энергией электронов 4 МэВ.....	30
3.3 Бетатрон с энергией электронов 7 МэВ.....	33
4 Моделирование в «Компьютерной лаборатории».....	42
4.1 Расчет защиты бетатрона .....	42
4.2 Мощность дозы от электронного пучка .....	44
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	48
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	49
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	49
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	49
5.1.3 SWOT-анализ.....	51
5.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	52
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	52
5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....	53
5.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	54
5.2.4 Бюджет научно-технического исследования .....	56
5.2.4.1 Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ.....	57

5.2.4.2 Основная заработная плата исполнителей .....	57
5.2.4.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы .....	58
5.2.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)..	59
5.2.4.5 Накладные расходы .....	59
5.2.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	60
5.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	60
5.4 Выводы по разделу.....	63
6 Социальная ответственность .....	64
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	64
6.2 Производственная безопасность .....	65
6.2.1 Микроклимат .....	66
6.2.2 Радиационная безопасность.....	67
6.2.3 Вентиляция .....	69
6.2.4 Шум .....	69
6.2.5 Освещенность рабочей зоны.....	70
6.2.6 Электробезопасность.....	72
6.2.7 Пожаробезопасность.....	74
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	75
6.4 Выводы по разделу.....	77
Заключение .....	79
Вывод.....	80
Список использованных источников .....	81

## Введение

В нашем современном мире некоторые люди боятся различных источников ионизирующего излучения, «радиации». Их страх понятен, ведь существуют болезни, вызываемые действием ионизирующего излучения. Однако, в ряде случаев, таких как лечение онкологических заболеваний, применение ионизирующего излучения является одним из лучших способов терапии.

Использование ионизирующего излучение в медицине началось с открытия радиоактивности. Постепенно ученые приходили к осознанию, что необходимо специализированное оборудование, которым можно лечить людей. Так появились рентгенотерапевтические аппараты на основе рентгеновских трубок, гамма-терапевтические установки на основе радионуклидных источников излучения  $^{60}\text{Co}$ , а также  $^{137}\text{Cs}$ , и различные виды ускорителей заряженных частиц: линейные ускорители электронов, синхротроны, циклотроны и бетатроны. И хотя еще в 60-х годах бетатроны, разрабатываемые в Томском политехническом университете, сначала использовались только для дефектоскопии, со временем их стали приспособлять к использованию в медицине.

Один из первых медицинских бетатронов ТПУ – малогабаритный бетатрон с выведенным электронным пучком на энергию 6 МэВ (МИБ-6Э). Его применяют в интраоперационной лучевой терапии (ИОЛТ) при комбинированном лечении злокачественных новообразований как в самостоятельном варианте, так и в сочетании с дистанционной лучевой терапией.

В настоящее время малогабаритный бетатрон МИБ-6Э в НИИ Онкологии Томского НИМЦ работает уже более 20 лет. Руководство НИИ планирует закупить и использовать новый малогабаритный бетатрон с энергией электронов 7 МэВ для замены действующего бетатрона. Для принятия решения руководству НИИ Онкологии необходимо понимать сможет ли бетатрон,



разработанный НПЛ «Бетатронная томография крупногабаритных объектов» (НПЛ БТКО) заменить действующую модель бетатрона. Для этого необходимо исследовать распределение интенсивности полей ионизирующего излучения, генерируемые новым бетатроном, и рассчитать защиту от излучения для персонала при проведении лечебных процедур с использованием бетатрона.

Целью данной работы является оценка радиационной безопасности при использовании малогабаритного импульсного бетатрона в НИИ Онкологии Томского НИМЦ.

Для выполнения поставленной цели были реализованы следующие задачи:

- изучить дозиметрические приборы, предназначенные для измерения распределения интенсивности импульсных дозовых полей излучения;

- исследовать распределение интенсивности дозовых полей тормозного излучения, генерируемых пучком электронов действующего бетатрона НИИ Онкологии и малогабаритного импульсного бетатрона НПЛ;

- провести анализ распределения интенсивности полей излучения бетатронов;

- рассчитать необходимую толщину защиты из свинца для размещения малогабаритного бетатрона НПЛ БТКО вместо действующего бетатрона НИИ Онкологии;

- рассчитать мощность дозы излучения, генерируемую электронным пучком малогабаритного бетатрона НПЛ БТКО.

Объектом исследования является источник импульсного ионизирующего излучения малогабаритный бетатрон с энергией ускоренных электронов 7 МэВ.

Предметом исследования является распределение интенсивности дозовых полей ионизирующего излучения, генерируемых при работе малогабаритного бетатрона.

## **1 Бетатроны**

В данной главе рассмотрим, как устроен объект исследования – источник импульсного ионизирующего излучения, бетатрон. А также, его применение в двух сферах: в медицине и в томографии.

Ускоренные электроны можно использовать двумя способами. Так как быстрые электроны эффективнее убивают раковые клетки, по сравнению с фотонным излучением, то используют выведенный из ускорителя пучок ускоренных частиц, который подводится непосредственно к опухоли. Если необходим мощный импульс тормозного излучения для просвечивания крупногабаритных объектов, то сбрасывают электронный пучок на мишень для генерации тормозного излучения.

### **1.1 Источник ионизирующего излучения**

Бетатрон – это индукционный ускоритель электронов, где для ускорения частиц по круговой орбите используют электрическое поле, индуктируемое изменяющимся во времени магнитным потоком. Это поле воздействует на ускоряемый электрон непрерывно в течении всего времени ускорения.

Катушки возбуждения электромагнита, питаемые переменным током, создают между полюсами аксиально симметричное магнитное поле, ось которого совпадает с осью тороидальной вакуумной камеры. Электроны инжектируются электронной пушкой в ускорительную камеру в тот момент, когда магнитное поле весьма слабое. Оно перемещает электроны по окружности. Затем с постепенным возрастанием создают вихревое электрическое поле, в котором движение электронов ускоряется до получения заданной энергии. При дополнительном воздействии магнитного поля электроны, обладающие высокой скоростью, смещаются с орбиты; происходит вывод пучка из бетатрона [1].

## 1.2 Бетатроны в медицине

При терапевтическом применении ускорителей выдвигаются строгие требования к профилю распределения дозы излучения в пучке: за геометрическими границами профиля пучка доза излучения не должна превышать предельную безопасную за один сеанс облучения. Поперечный размер пучка изменяют в зависимости от величины облучаемой опухоли.

Одно из существенных требований к современным медицинским бетатронам – возможность использовать для терапии непосредственно ускоренный пучок электронов наряду с тормозным излучением бетатрона.

Отличительной чертой бетатронов, генерирующих тормозное излучение, по сравнению с рентгеновскими установками является то, что бетатроны могут быть использованы при облучении на слои ткани, лежащие на некоторой глубине под поверхностью.

Чтобы добиться определенного профиля пучка тормозного излучения необходимо использовать систему свинцовых диафрагм, иными словами коллиматор. Так как излучение бетатрона обладает высокой энергией, толщина коллиматора в направлении распространения излучения достигает значительных размеров. Если ось пучка точно совпадает с осью отверстия коллиматора, то распределение интенсивности излучения относительно оси пучка получается симметричным. Но установка и регулирование коллиматора относительно оси пучка занимает достаточно много времени. Поэтому центральную часть коллиматора изготавливают в виде отдельной втулки, которую можно свободно заменить другой с новым отверстием [2].

Также выделяют еще одну положительную черту бетатрона, представляющую из себя движение вторичных электронов при большой энергии излучения преимущественно в направлении распространения первичного пучка квантов. Эта характеристика позволяет более точно локализовать излучение внутри тела.

Коллиматор пучка для терапии электронами состоит из экрана и тубуса. Экран предназначен для ограничения угла пучка электронов за пределами установленных границ. При этом интенсивность тормозного излучения, возникающего в материале при торможении в нем электронов, и поток вторичных электронов, образуемых на внутренних краях экрана, должны быть минимальными. Эти противоречивые требования удовлетворяются соответствующим выбором размеров экрана и специальной композицией точно определенных пропорций стали и свинца, из которых изготавливают экран. Тубус из оргстекла используют для совмещения выходного сечения пучка электронов с полем облучения объекта (пациента).

Для уменьшения «загрязнения» пучка рассеянным излучением, генерируемым материалом коллиматора, его приближают к пациенту. Поэтому коллиматоры для пучка электронов съемные, отдельные для каждого размера и формы поля облучения и их прикрепляют к бетатрону с помощью специального держателя. Конический выравнивающий фильтр, используемый при гамма-излучении, заменяют очень тонкой медной пластинкой, при прохождении через которую пучок электронов заметно расширяется за счет рассеяния. При правильном подборе фильтра однородность пучка электронов получается вполне удовлетворительной [4].

### **1.3 Бетатронная томография крупногабаритных объектов**

Так как прогресс не стоит на месте, и возрастает необходимость в изделиях из материалов без дефектов, то необходимо отслеживать все возможные дефекты, так как технология изготовления материалов недостаточно совершенна.

Известно, что томографические методы позволяют значительно повысить чувствительность к дефектам и упростить расшифровку результатов контроля. В рентгеновской компьютерной томографии представлено пять

поколений томографов, каждое из которых определяется своей схемой сканирования [5].

Малогобаритные бетатроны, как источники излучения для радиационной дефектоскопии и компьютерной томографии, обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами ускорителей. Они имеют схожую энергию излучения (от 2 до 35 МэВ), малый размер фокусного пятна, возможность регулирования максимальной энергии, непрерывный спектр тормозного излучения. Эти преимущества позволили осуществлять контроль материалов или изделий с широким диапазоном толщин (до 400 мм по стали).

В настоящее время разработчики малогобаритных бетатронов уменьшают фокусное пятно до микронного уровня при сохранении уже имеющегося уровня мощности дозы. Высокие характеристики излучения, простота и эксплуатационная надежность, а также радиационная безопасность в выключенном состоянии обеспечивают малогобаритным бетатронам устойчивый спрос на отечественном и зарубежном рынках [6].

#### **Выводы по главе**

Тормозное излучение генерируется как при попадании электронов на мишень (генерация полезного излучения), а также когда электроны выпадают из равновесной орбиты и тормозятся в стенках вакуумной камеры и других составных частях ускорителя (неиспользуемое фоновое излучение ускорителя).

В следующей главе рассмотрим методы и приборы с помощью которых можно измерить интенсивность дозовых полей импульсных источников.

## 2 Методы регистрации ионизирующего излучения

В настоящее время возросло количество источников, генерирующих ионизирующее излучение. Большинство из них представляют собой генератор импульсных излучений.

Основываясь на характеристике импульсного излучения, можно сделать вывод, что для измерения мощности дозы дозиметры должны показывать и дозу в импульсе, и длительность импульса излучения. Необходимо отметить факт того, что для дозиметрии импульсных и непрерывных излучений понятия поглощенная и эквивалентная доза идентичны [7].

Слабопроникающее излучение не может проникать в тело и создает дозы во внешних органах (хрусталике глаза, коже), а сильнопроникающее, наоборот, проникает в тело, создает дозы во внутренних органах, тем самым дает вклад в эффективную дозу [8].

При регистрации фотонного излучения используются: газонаполненные, твердотельные (сцинтилляционные и полупроводниковые), химические, калориметрические и фотоэмульсионные детекторы. Далее рассмотрим разные примеры дозиметров, которые можно использовать при дозиметрическом контроле.

У газонаполненных детекторов существует три режима работы: ионизационная камера, пропорциональный детектор с газовым усилением, счетчик Гейгера-Мюллера.

Научное сообщество провело эксперименты по внедрению дозиметров со счетчиком Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного излучения. Один из таких экспериментов показал, что использование дозиметра ДКГ-РМ1621 для радиационного контроля импульсных источников тормозного излучения возможно в определенном диапазоне мощностей доз (с энергией установки до 20 МэВ).

При проведении и обработки результатов экспериментов в работе использовались следующие понятия: чувствительность дозиметра; мертвое

время счетчика; длительность импульсного излучения; частота следования импульсного излучения; доза в импульсе излучения. Исходя из вышеприведенных понятий, рассчитывалась средняя мощность дозы импульсного ионизирующего источника и вероятность срабатывания счетчика при воздействии импульса излучения при дозе в импульсе [9].

На рынке представлен дозиметр импульсного излучения на основе ионизационной камеры – это дозиметр Ram-ION, который был разработан Rotem Industries Ltd. Это израильская государственная компания, основанная еще в начале 1980-х годов, которая сейчас специализируется на коммерциализации передовых технологий и науки в междисциплинарной среде. Компания специализируется на новейших инновациях, собирая технический урожай научных исследований и разработок в интересах академических, промышленных, оборонных и коммерческих сообществ по всему миру [10].

Сцинтилляционные детекторы, могут работать в двух режимах: в счетном или в токовом режиме. Они не используются в счетном режиме для измерения импульсных полей фотонного излучения. Зато в токовом режиме дозиметр удобен для измерений, ведь количество фотонов, испускаемых сцинтиллятором, пропорционально поглощенной дозе в биологической ткани.

Сцинтилляционные детекторы нельзя использовать при измерении мощных коротких импульсов, так как присутствует нелинейность фотоэлектронных умножителей при передаче больших токов.

В настоящее время на рынке Российской Федерации присутствуют два дозиметра на основе органических сцинтилляторов, претендующих на измерение импульсного излучения: ДКС-96 с блоком БДКС-966, производителем является НПП «Доза»; ДКС-АТ1123 от производителя НПУП «Атомтех» [11].

«Атомтех» – это научно-исследовательский и производственный центр Республики Беларусь, основанный еще в 1995 году, сейчас он известен своими разработками в области ядерных измерений и радиационного контроля.

Основные характеристики дозиметра ДКС-АТ1123 (рисунок 2.1), с помощью которого проводилось тестовое измерение распределения интенсивности дозовых полей на бетатроне МИБ-4, представлены в таблице 2.1 [11].



Рисунок 2.1 – Сцинтилляционный дозиметр ДКС-АТ1123

Таблица 2.1 – Характеристики ДКС-АТ1123

Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы непрерывного излучения	50 нЗв/ч - 10 Зв/ч
Диапазон измерений средней мощности амбиентного эквивалента дозы импульсного излучения	30 пЗв/с – 3 мЗв/с
Диапазон измерения амбиентного эквивалента дозы непрерывного и импульсного излучения	10 нЗв – 10 Зв
Диапазон энергий непрерывного излучения	15 кэВ – 3 МэВ
Диапазон энергий импульсного излучения	15 кэВ – 10 МэВ
Предел основной относительной погрешности измерений непрерывного излучения	±15 %
Предел основной относительной погрешности измерений импульсного излучения	±30 %

Измерение распределения интенсивности дозовых полей на бетатроне с энергией электронов 7 МэВ проводилось с помощью дозиметра ДКС-АТ5350/1 от «Атомтех».



Высокоточный дозиметр с широкими функциональными возможностями может измерить: керму в воздухе, поглощенную дозу в воздухе, поглощенную дозу в воде, экспозиционную дозу, эквивалентную дозу.

Дозиметр состоит из блока измерительного электрометрического (электрометр) и из ионизационной камеры фирмы PTW-Freiburg на выбор. Измерения проводились с камерой ТМ30001-10 диаметром 16,5 мм и объемом 0,6 см<sup>3</sup> (рисунок 2.2) [11].



Рисунок 2.2 – Дозиметр ДКС-АТ5350/1 с ионизационной камерой ТМ30001-10

Основные характеристики дозиметра ДКС-АТ5350/1 представлены в таблице 2.2 [11].

Таблица 2.2 – Характеристики ДКС-АТ5350/1

Диапазон силы постоянного тока	$1 \cdot 10^{-15} - 1 \cdot 10^{-6} \text{ А}$
Диапазон электрического заряда	$1 \cdot 10^{-15} - 1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$
Диапазон заряда методом численного интегрирования тока	$1 \cdot 10^{-14} - 1 \cdot 10^{-1} \text{ Кл}$
Погрешность измерений электрометра	не более (0,1 - 0,5) %
Диапазон мощности кермы в воздухе	0,4 мкГр/мин - 10 кГр/мин
Диапазон кермы в воздухе	0,05 мкГр - 15 Гр
Диапазон кермы в воздухе методом численного интегрирования мощности кермы	0,05 мкГр - 1,5 МГр
Погрешность измерений дозиметра	не более $\pm 3 \%$

Полупроводниковые кремниевые детекторы по принципу действия похожи на ионизационные камеры, поэтому могут быть использованы с определенными ограничениями для дозиметрии импульсного излучения.

Приведем примеры приборов, которые определяют параметры рентгеновских аппаратов: Piranha и Cobia, выпускаемые шведской фирмой RTI1 Electronics AB, которая была основана еще в 1981 году, сейчас же она создает тенденции в области рентген-контроля и обслуживания приборов.

Также дозиметрический прибор RaySafe Xi изготовленный шведской фирмой Unfors RaySafe AB, которая была основана в 1994 году, сейчас же она предоставляет комплексные системы мониторинга доз для рентген-кабинетов (устройства контроля качества и обслуживания диагностических рентгенологических аппаратов, программное обеспечение для отслеживания дозы облучения пациентов).

Дозиметр на основе термолюминесцентных детекторов ДТЛ-02 используется для измерения импульсного излучения.

Детекторы на основе конденсаторной ионизационной камеры используются в России в данный момент такие как дозиметры Arrow-Tech, выпускаемые в США, дозиметры ДДГ-01Д российской компании НПП «Доза» [7].

### **Выводы по главе**

На настоящее время для дозиметрии импульсного фотонного излучения идеально подходят: ионизационные камеры различных конструкций; пассивные накопительные дозиметры.

Доза облучения предстает дозиметрическим параметром, которая нормируется на значение какого-либо параметра конкретного источника излучения.

С помощью дозиметра ДКС-АТ1123 проводилось тестовое измерение распределения интенсивности дозовых полей на бетатроне МИБ-4.

С помощью дозиметра ДКС-АТ5350/1 с ионизационной камерой ТМ30001-10 проводилось измерение распределения интенсивности дозовых полей на бетатроне с энергией электронов 7 МэВ.

### 3 Экспериментальная часть

В этой главе рассмотрим проведенные эксперименты и их результаты на бетатронах различной энергией электронов:

- распределение интенсивности дозовых полей бетатрона с энергией электронов 6 МэВ;
- тестовое измерение на бетатроне МИБ-4;
- дозиметрический контроль бетатрона с энергией электронов 7 МэВ.

#### 3.1 Бетатрон с энергией электронов 6 МэВ

Медицинский бетатрон с энергией электронов 6 МэВ находится в НИИ Онкологии города Томск, рисунок 3.1. Бетатрон МИБ-6Э располагается на пятом этаже в комнате площадью 28,4 м<sup>2</sup>.



Рисунок 3.1 – Бетатрон МИБ-6Э

МИБ-6Э обладает следующими характеристиками: длительность импульсов 1 мкс; частота повторения импульсов 100 Гц.

Управление энергией ускоренных электронов осуществляется с пульта управления бетатрона [12].

Помещение удовлетворяет требованиям ОСПОРБ-99/2010 [13]: пол, стены, потолки и поверхности шкафов имеют влагостойкие покрытия, слабо сорбирующие радиоактивные вещества и допускающие влажную уборку, дезактивацию.

Сотрудники НИИ Онкологии передали данные об экспозиционной дозе на расстоянии 1 м от бетатрона. Сведения были получены в обычном режиме работы бетатрона. Электронный пучок поглощался в полиэтилене достаточной толщины для минимизации влияния тормозного излучения основного пучка на фоновое излучение. Для измерения экспозиционной дозы использовали клинический дозиметр 27012.

Так как была измерена доза в рентгенах, необходимо для дальнейшего сравнения перевести в дозу в зиверты. Существует соотношение:  $1 \text{ Р} = 0,95 \text{ рад}$  и  $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$  [14]. Так как взвешивающий коэффициент излучения для фотонов любых энергий равен единице, то в нашем случае  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Зв}$ .

Согласно [15] медицинские ускорители электронов, энергия которых не превышает 25 МэВ, следует относить к 4 категории потенциальной радиационной опасности.

Мощность дозы в пучке от электронов варьируется от 4 до 7 Гр/мин.

На рисунке 3.2 представлено измерение мощности дозы тормозного излучения на бетатроне МИБ-6Э сотрудниками ТНИМЦ НИИ Онкологии на расстоянии 1 метр вокруг ускорителя и с центром в точке вывода пучка электронов. А в таблице 3.1 приведены значения доз, приведенных к 1 ч работы бетатрона.

На рисунке 3.3, представлено угловое распределение доз в полулогарифмическом масштабе бетатрона МИБ-6Э на основе таблицы 3.1. Так как в диапазоне от  $70^\circ$  до  $270^\circ$  измерения дозы не проводились, то на рисунке 3.3 изображено частичное азимутальное распределение.

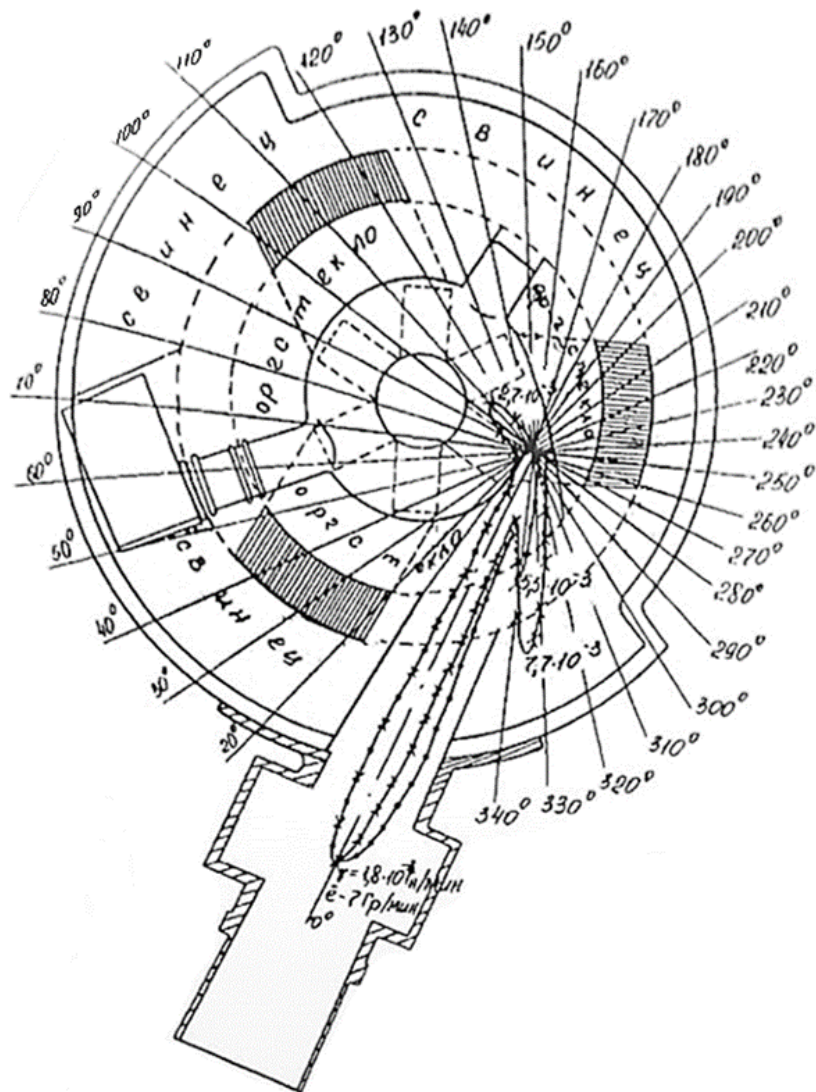


Рисунок 3.2 – Азимутальное распределение мощности дозы тормозного излучения бетатрона МИБ-6Э

Таблица 3.1 – Угловое распределение дозы бетатрона МИБ-6Э, приведенных к 1 ч работы

φ, град.	Доза, Р	Доза, мЗв
0	16,0	152,0
5	7,0	66,5
10	4,9	46,55
15	3,4	32,3
20	3,2	30,4
25	3,5	33,25
30	3,7	35,15
35	4,0	38,0

Продолжение таблицы 3.1

40	2,7	25,65
45	2,3	21,85
50	1,8	17,1
60	1,3	12,35
70	1,0	9,5
270	0,7	6,65
280	1,0	9,5
290	1,3	12,35
300	1,9	18,05
310	2,6	24,7
320	3,7	35,15
330	4,5	42,75
340	4,5	42,75
350	11,0	104,5

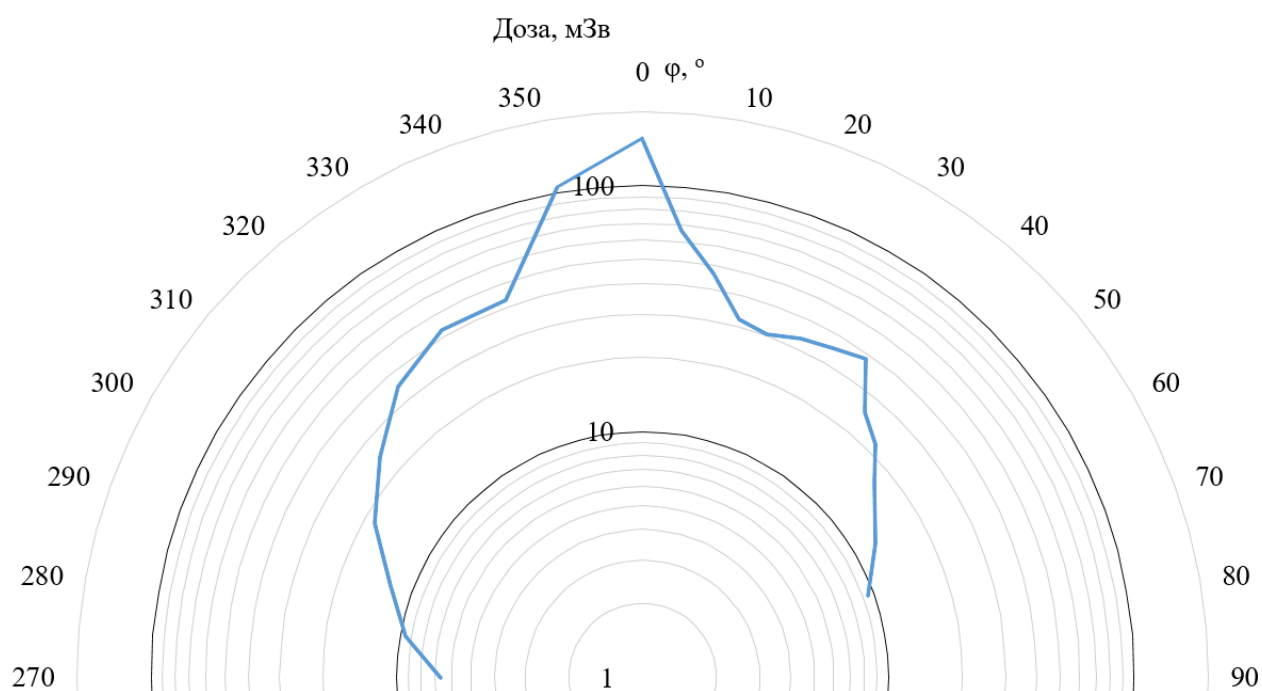


Рисунок 3.3 – Азимутальное распределение доз в полулогарифмическом масштабе бетатрона МИБ-6Э

### 3.2 Бетатрон с энергией электронов 4 МэВ

Пока бетатрон с энергией электронов 7 МэВ находился на стадии настройки, было проведено тестовое измерение дозы на бетатроне МИБ-4.

Измерения проводились в ТПУ корпусе № 18 Бункере № 2, площадь помещения 29,4 м<sup>2</sup>. Частота МИБ-4 составляет 400 Гц.

Внешний вид бетатрона МИБ-4 представлен на рисунке 3.4, а схема бетатрона МИБ-4 представлена на рисунке 3.5 [6]. Где цифры обозначают: 1 – патрубков для инжектора; 2 – внутренняя микромишень; 3 – стойка обратного магнитопровода; 4 – экспериментальная бетатронная камера; 5 – патрубков для откачки вакуума.

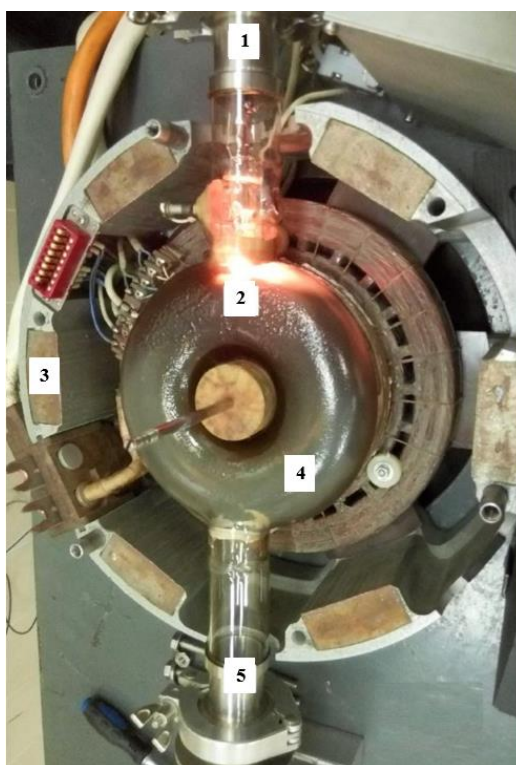


Рисунок 3.4 – Бетатрон МИБ-4

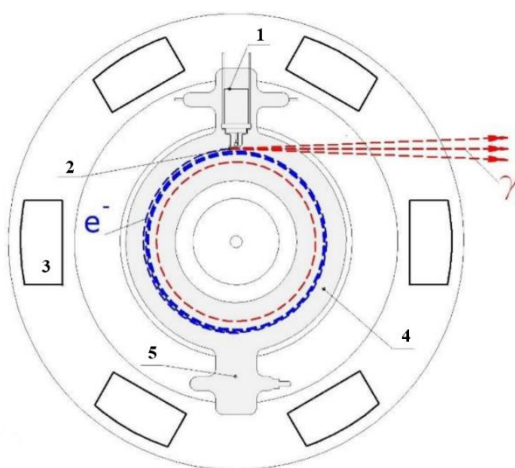


Рисунок 3.5 – Схема МИБ-4

Доза измерялась с помощью дозиметра ДКС-АТ1123. Сначала был измерен фон в бункере (на расстоянии 1 м от выключенного бетатрона): за 12 минут дозиметр измерил 38 нЗв. Мощность дозы фона  $\dot{H}_\phi = 0,192$  мкЗв/ч. Значение фона не превышает проектную мощность дозы за стационарной защитой ускорителя электронов для помещений и территории различного назначения для персонала группы А и Б [15].

Помещение, где установлен бетатрон, удовлетворяет основным профилактическим мероприятиям, к которым относятся правильный выбор планировки помещений, оборудования, отделки помещений, технологических режимов, рациональная организация рабочих мест, соблюдение мер личной гигиены работающими, рациональные системы вентиляции, защиты от внешнего и внутреннего облучения [16].

В таблицу 3.2 занесены дозы и времена измерения при работе бетатрона 1 мин на расстоянии 1 м от бетатрона в горизонтальной плоскости.

Таблица 3.2 – Азимутальное распределение доз бетатрона МИБ-4

Доза, мкЗв	Время, мин	$\phi$ , °
1440	6	0
480	2	45
165	2	60
130	2	90
124	2	120
211	2	135
243	2	225
330	2	240
216	2	270
450	2	300

Так как значение фона примерно в  $10^5$  раз меньше значений доз при работе бетатрона, то фон можно не учитывать. В таблицу 3.3 занесены значения доз, приведенных к 1 ч работы бетатрона в штатном режиме.

Таблица 3.3 – Азимутальное распределение доз бетатрона МИБ-4, приведенных к 1 ч работы

Доза, мЗв	$\phi$ , °
14,4	0
14,4	45
5,0	60



### Продолжение таблицы 3.3

3,9	90
3,7	120
6,3	135
7,3	225
9,9	240
6,5	270
13,5	300

Распределение доз вдали от первичного угла в идеальной модели генерации фонового излучения бетатрона должно симметрично убывать, но так как некоторые измерения были проведены при условии, что на пути от источника излучения дозиметра стояла стойка обратного магнитопровода, которая гасила часть излучения, то распределение получилось неравномерное.

Также чтобы убедиться в отсутствии вреда ионизирующего излучения на человека в ходе эксперимента, была измерена доза в пультовой при закрытой двери, когда бетатрон работает: она составила 15 нЗв за 280 с. Полученное значение мощности дозы равняется  $\dot{H}_п = 0,192$  мкЗв/ч. Сравнивая значение мощности дозы в пультовой со значением фона, можем сделать вывод, что защита выполняет свою функцию, так значение в пультовой не превышает значения фона, и, следовательно, не превышает ДМД.

Исходя из опыта тестового измерения, был сделан вывод о необходимости более точного измерения шага, поэтому в измерениях на бетатроне с энергией электронов 7 МэВ использовался угломер-квадрант.

### **3.3 Бетатрон с энергией электронов 7 МэВ**

Измерения проводились в ТПУ корпусе № 18 Бункере № 2. Использовался дозиметр ДКС-АТ5350/1 с камерой ТМ30001-10.

Бетатрон с энергией электронов 7 МэВ обладает следующими характеристиками: длительность импульса излучения 5 мкс; частота 320 Гц.

Был измерен фон за 64 с. Дозиметр показал 5 нЗв. Мощность дозы составила 0,28 мкЗв/ч, значение фона не превышает ДМД для персонала группы А и Б, также в пультовой не наблюдалось превышения.

Измерения проводились на расстоянии 1 м от центра бетатрона в горизонтальной плоскости с шагом в 10°, таблица 3.4.

Таблица 3.4 – Азимутальное распределение дозы тормозного излучения, генерируемое бетатроном с энергией электронов 7 МэВ

φ, °	Доза, мЗв	Время, с
0	171,380	120
	166,700	120
	185,110	130
10	38,453	121
20	18,326	120
30	11,439	120
40	9,276	120
50	9,061	120
60	7,701	120
70	4,420	121
80	4,593	120
90	7,177	120
	7,464	125
	6,154	120
100	7,062	120
110	9,304	119
120	5,604	121
130	5,553	121
140	5,267	121
150	5,898	120
160	5,528	120
170	6,414	120
180	6,958	130
	6,210	120
	6,381	120
190	5,972	120
200	5,240	120
210	4,107	120
220	3,422	120
230	3,091	120
240	2,672	120
250	2,776	120
260	2,776	120
270	3,395	120
	3,040	120
	3,017	120
280	4,464	120
290	8,306	120
300	10,401	120
310	11,745	120

Продолжение таблицы 3.4

320	14,347	120
330	24,360	120
340	49,534	120
350	124,930	120

В углах 0°, 90°, 180° и 270° измерение было проведено три раза и взято среднее значение. В таблице 3.5 представлено азимутальное распределение доз, приведенных к 1 ч работы бетатрона в штатном режиме.

Таблица 3.5 – Азимутальное распределение дозы тормозного излучения, генерируемое бетатроном с энергией электронов 7 МэВ, приведенных к 1 ч работы

φ, °	Доза, Зв
0	5,090
10	1,144
20	0,550
30	0,343
40	0,278
50	0,272
60	0,231
70	0,132
80	0,138
90	0,205
100	0,212
110	0,281
120	0,167
130	0,165
140	0,157
150	0,177
160	0,166
170	0,192
180	0,190
190	0,179
200	0,157
210	0,123
220	0,103
230	0,093
240	0,080
250	0,083
260	0,083
270	0,095
280	0,134
290	0,249

Продолжение таблицы 3.5

300	0,312
310	0,352
320	0,430
330	0,731
340	1,486
350	3,748

На основании таблицы 3.5 построен рисунок 3.6 в полулогарифмическом масштабе, радиус колец показывает значение дозы в измеренном угле на расстоянии 1 м от бетатрона в горизонтальном положении (плоскость ХУ). С шагом 60° на бетатроне стоят стойки обратного магнитопровода (аналогично бетатрону МИБ-4), которые гасят излучение.

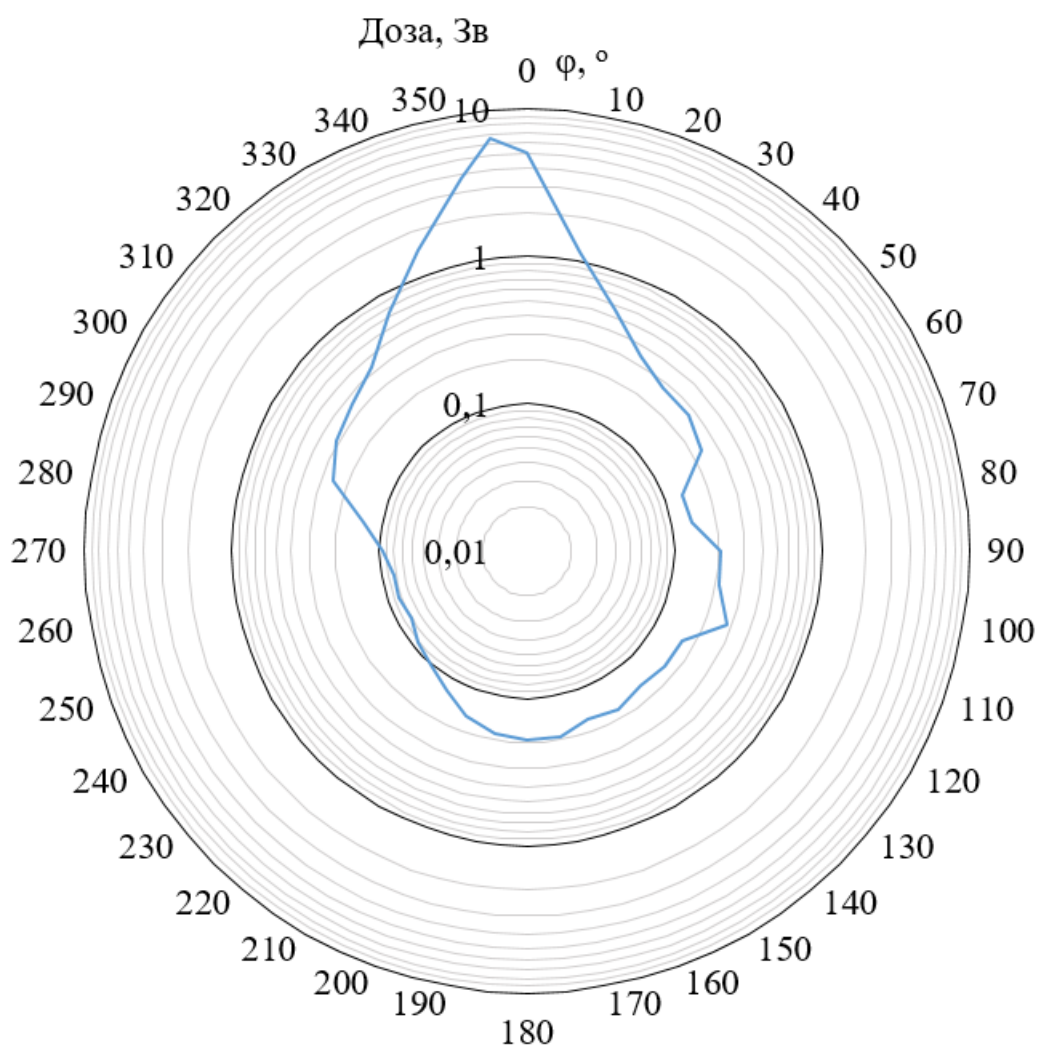


Рисунок 3.6 – Азимутальное распределение доз в полулогарифмическом масштабе бетатрона с энергией электронов 7 МэВ

Пучок располагается на  $\varphi = 355^\circ$ , значение дозы в пучке составляет 216,97 мЗв за 120 с, что соответствует  $\dot{D} = 6,5$  Зв, приведенных к 1 ч работы бетатрона.

Также была измерена доза в вертикальной плоскости (плоскость XZ), таблица 3.6, где  $\varphi = 0^\circ$  совпадает с  $\theta = 0^\circ$ . Трехмерное представление пространства, где в центре находится бетатрон с энергией электронов 7 МэВ представлено на рисунке 3.7.

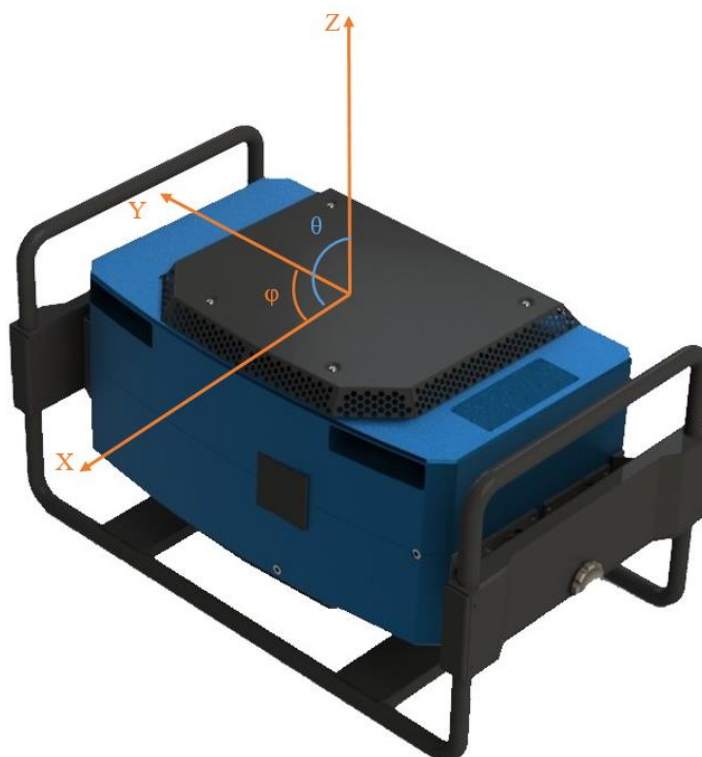


Рисунок 3.7 – Бетатрон с энергией электронов 7 МэВ

Таблица 3.6 – Полярное распределение доз на бетатроне с энергией электронов 7 МэВ

$\theta, ^\circ$	Доза, мЗв	Время, с
30	9,869	125
45	6,192	120
60	3,011	120
90	1,387	120

В таблице 3.7 представлено полярное распределение доз, приведенных к 1 ч работы бетатрона в штатном режиме.

Таблица 3.7 – Полярное распределение доз на бетатроне с энергией электронов 7 МэВ, приведенных к 1 ч работы

$\theta, ^\circ$	Доза, Зв
30	0,284
45	0,184
60	0,090
90	0,042

На рисунке 3.8 изображено полярное распределение доз бетатрона. Синяя линия представляет собой экспоненциальную линию тренда, величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9849$ .

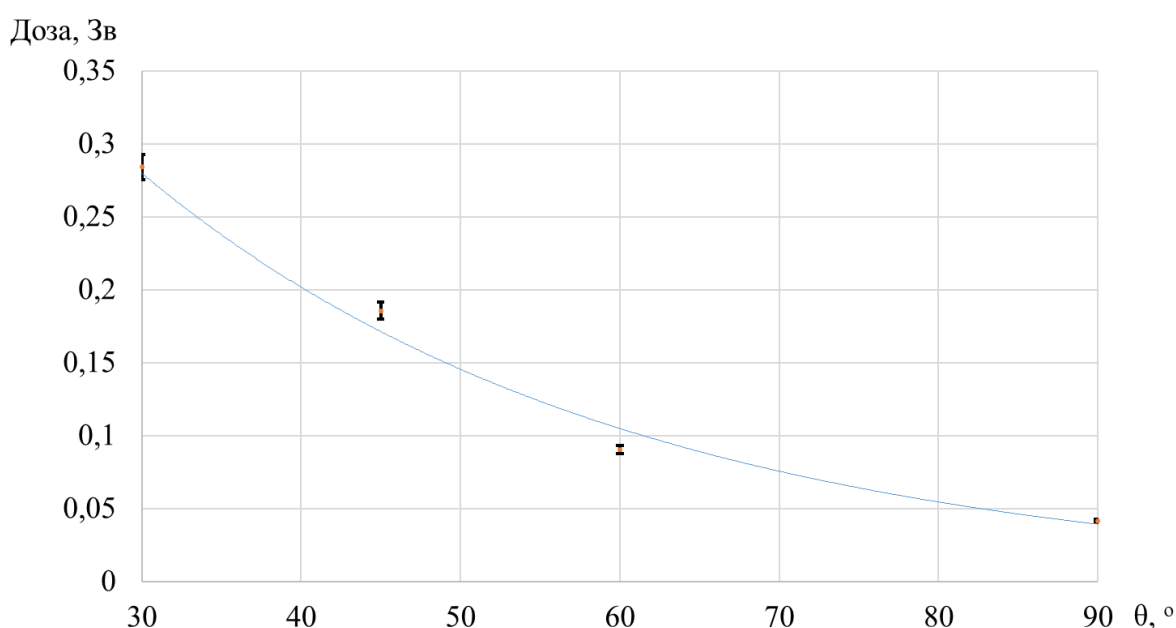


Рисунок 3.8 – Полярное распределение доз бетатрона с энергией электронов 7 МэВ

Также был проведен расчет погрешности, так как в ключевых точках измерение производилось три раза ( $n = 3$ ). Оценка расширенной неопределенности по схеме 1 согласно [17].

Среднее арифметическое значение эффективной дозы, приведенное к 1 ч работы бетатрона с энергией электронов 7 МэВ:

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 E_i = 5,09 \text{ Зв.} \quad (1)$$

Среднее квадратичное отклонение, характеризующее случайную составляющую погрешности при измерениях дозы:

$$S(\bar{E}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n(n-1)}} = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ Зв.} \quad (2)$$

Относительное среднее квадратическое отклонение:

$$\tilde{S}(\bar{E}) = \frac{S(\bar{E})}{\bar{E}} \cdot 100 \% = \frac{4,4 \cdot 10^{-2}}{5,09} \cdot 100 \% = 0,86 \% \quad (3)$$

Границы неисключенной систематической погрешности:

$$\theta_E = \tilde{\theta}_E \cdot \frac{\bar{E}}{100 \%} = 1 \% \cdot \frac{5,09}{100 \%} = 0,051 \text{ Зв.} \quad (4)$$

Доверительные границы суммарной неисключенной систематической погрешности (при  $p = 0,95$ ;  $k = 1,1$ ):

$$\theta(0,95) = 1,1 \cdot \theta_E = 1,1 \cdot 0,051 = 0,056 \text{ Зв.} \quad (5)$$

Относительные доверительные границы суммарной неисключенной систематической погрешности:

$$\tilde{\theta}(0,95) = \frac{\theta(0,95)}{\bar{E}} \cdot 100 \% = \frac{0,056}{5,09} \cdot 100 \% = 1,1 \% \quad (6)$$

Доверительные границы случайной погрешности результата измерений  $B(p)$  для доверительной вероятности  $p$  ( $f_{\text{эфф}} = 3 - 1 = 2$ ), где  $t_{0,95}(2) = 4,302$ :

$$B(0,95) = t_p(f_{\text{эфф}}) \cdot S(\bar{E}) = t_{0,95}(2) \cdot S(\bar{E}) = 4,302 \cdot 4,4 \cdot 10^{-2} = 0,189 \text{ Зв.} \quad (7)$$

Относительные доверительные границы случайной погрешности результата измерений:

$$\tilde{B}(0,95) = \frac{B(p)}{\bar{E}} \cdot 100 \% = \frac{0,189}{5,09} \cdot 100 \% = 3,71 \% \quad (8)$$

Доверительные границы суммарной погрешности результата при:

$$\frac{\theta(0,95)}{S(\bar{E})} = \frac{0,056}{4,4 \cdot 10^{-2}} = 1,3; \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{\theta(0,95)}{\sqrt{3 \cdot 1,1 \cdot S(\bar{E})}} = 0,668; \quad (10)$$

$$K(\gamma) = \frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{1+\gamma} = 0,721; \quad (11)$$

$$\Delta_{0,95} = K(\gamma) \cdot (B(0,95) + \theta(0,95)) = 0,177 \text{ Зв.} \quad (12)$$

Относительные доверительные границы суммарной погрешности результата:

$$\tilde{\Delta}_{0,95} = 3,5 \%. \quad (13)$$

Неопределенность измерений (тип А – оценка стандартной неопределенности, обусловленная источниками неопределенности, имеющими случайный характер) и относительная неопределенность измерений тип А:

$$\hat{u}_A = S(\bar{E}) = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ Зв;} \quad (14)$$

$$\tilde{u}_A = 0,86 \%. \quad (15)$$

Неопределенность измерений (тип В – оценка стандартной неопределенности, обусловленная источниками неопределенности, имеющими систематический характер) и относительная неопределенность измерений тип В:

$$\hat{u}_B = \frac{\theta(0,95)}{k\sqrt{3}} = \frac{0,056}{1,1 \cdot \sqrt{3}} = 0,03 \text{ Зв;} \quad (16)$$

$$\tilde{u}_B = \frac{\hat{u}_B}{E} \cdot 100 \% = \frac{0,03}{5,09} \cdot 100 \% = 0,6 \%. \quad (17)$$

Суммарная стандартная неопределенность:

$$\hat{u}_C = \sqrt{\hat{u}_A^2 + \hat{u}_B^2} = \sqrt{(4,4 \cdot 10^{-2})^2 + (0,03)^2} = 0,053 \text{ Зв.} \quad (18)$$

Оценка эффективного числа степеней свободы:

$$v_{\text{eff}} = f_{\text{эфф}} \cdot \left[ 1 + \frac{\hat{u}_B^2}{\hat{u}_A^2} \right]^2 = 2 \cdot \left[ 1 + \frac{0,03^2}{(4,4 \cdot 10^{-2})^2} \right]^2 = 4,3. \quad (19)$$

Оценка расширенной неопределенности ( $t_{0,95}(4) = 2,776$ ) и относительная оценка неопределенности:

$$\hat{U}_{0,95} = t_p(v_{\text{эфф}}) \cdot \hat{u}_C = 2,776 \cdot 0,053 = 0,147 \text{ Зв;} \quad (20)$$



$$\tilde{U}_{0,95} = \frac{\hat{U}_{0,95}}{\bar{E}} \cdot 100 \% = \frac{0,147}{5,09} \cdot 100 \% = 2,9 \%. \quad (21)$$

Представление результатов измерений:

$$\{E_{\min}, E_{\max}\} = \bar{E} \pm \hat{U}_{0,95} = 5,09 \pm 0,15 \text{ Зв}. \quad (22)$$

Погрешность измерений составила 3 %.

### **Выводы по главе**

Измерен фон в помещении при выключенном бетатроне и фон в пультовой при включенном бетатроне, значения не превысили нормируемые величины.

Были построены круговые распределения доз бетатронов, а также измерена доза над бетатроном в вертикальной плоскости.

Посчитана погрешность измерений, которая составила 3 %.

В следующей главе продолжим рассматривать бетатрон с энергией электронов 7 МэВ, проведем моделирование в «Компьютерной лаборатории».

## 4 Моделирование в «Компьютерной лаборатории»

С помощью «Компьютерной лаборатории» возможно произвести моделирование пучка бетатрона, его взаимодействие с мишенью, генерации тормозного излучения и расчет защиты. Моделирование системы формирования пучка методом Монте-Карло осуществлялось в программе «Компьютерная лаборатория» (КЛ/PCLab). Метод Монте-Карло – это метод решения задач путем случайного воспроизведения работы отдельных компонентов задачи. Расчет данным методом основан на имитации какого-либо процесса, выполнении случайным образом каких-либо операций большое число раз до достижения определенного результата. В данном случае метод заложен в программу, которая выполняется на компьютере, что облегчает задачу [18]. В дипломной работе используются четыре режима программы PCLab.

### 4.1 Расчет защиты бетатрона

Перед нами стояла задача определить условия, при которых бетатрон с энергией электронов 7 МэВ может занять место бетатрона с энергией электронов 6 МэВ в НИИ Онкологии. Требовалось рассчитать толщину защиты из свинца для обеспечения безопасных условий работы.

Первый способ решения поставленной задачи – сравнить дозу тормозного излучения в конкретных точках на бетатронах с энергией электронов 6 МэВ и 7 МэВ и в режиме ПРОТЕСТ с помощью номограмм определить необходимую толщину защиты, принимая за нормируемую величину значения бетатрона с энергией электронов 6 МэВ. Поэтому сравнивая таблицы 3.1 и 3.5 и используя PCLab, была составлена таблица 4.1.

Таблица 4.1 – Толщина защиты из свинца для бетатрона с энергией электронов 7 МэВ 1 способ

$\varphi, ^\circ$	$d, \text{мм}$
20	64,29
30	49,08
45	53,44

Продолжение таблицы 4.1

60	61,21
275	56,93
300	59,44
315	54,29
330	61,88
340	79,31

Диапазон толщины защиты из свинца первым способом составил от 49,1 до 79,3 мм.

Второй способ основывается на документе [19], так как бетатрон с энергией электронов 7 МэВ хотят использовать как медицинский ускоритель. По нормативному документу доза вне пучка на расстоянии 1 м от бетатрона должна составлять 0,1 % от значения в пучке. В нашем случае доза не должна превышать 6,5 мЗв, приведенных к 1 ч работы бетатрона с энергией электрона 7 МэВ. В режиме PROTECT с помощью номограмм определили необходимую толщину, таблица 4.2.

Таблица 4.2 – Толщина защиты из свинца для бетатрона с энергией электрона 7 МэВ 2 способ

$\varphi, ^\circ$	$d, \text{мм}$
15	109,7
25	93,71
40	81,19
55	77,59
80	65,93
90	74,62
100	70,56
115	68,37
130	59,41
145	58,16
155	57,91
165	58,15
175	59,25
185	58,79
195	57,47
205	54,42
220	49,39
235	47,86
250	50,05
260	54,47

Продолжение таблицы 4.2

270	57,61
295	80,05
310	86,55
325	99,71
335	115,9

Диапазон толщины защиты из свинца вторым способом составил от 47,9 до 116 мм. Во втором способе рассматривается больше углов, а также толщина защиты из свинца, вторым способом, больше, чем первым.

#### 4.2 Мощность дозы от электронного пучка

Также стояла задача определить мощность дозы от электронного пучка бетатрона с энергией электронов 7 МэВ. Чтобы определить ток, считая источник постоянным были выбраны два способа, первый способ основывался на значении, взятом из рисунка 4.1 [20].

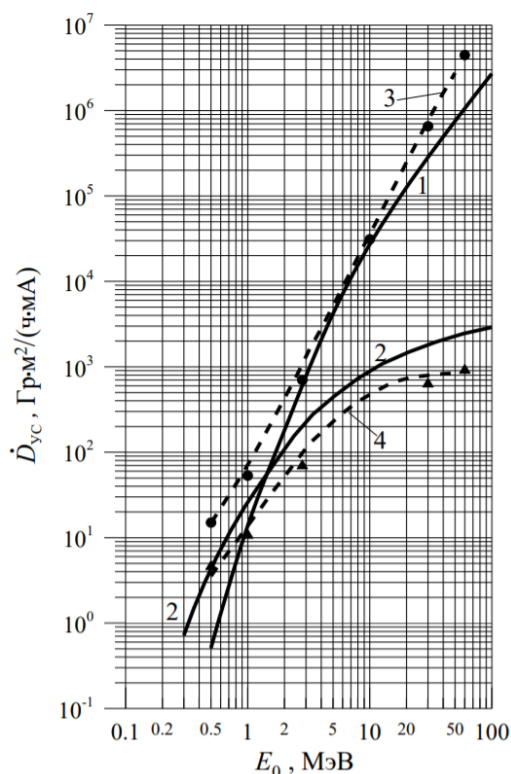


Рисунок 4.1 – Мощность показателя тканевой поглощенной дозы тормозного излучения в зависимости от энергии электронов.

Кривые 1 ( $0^\circ$ ) и 2 ( $90^\circ$ ), 3 ( $0^\circ$ ) и 4 ( $85^\circ$ ); точки ( $0^\circ$ ) и треугольники ( $90^\circ$ )

Мощность показателя тканевой поглощенной дозы тормозного излучения при энергии электронов 7 МэВ равняется  $\dot{D}_{H1} = 10^4$  Гр·м<sup>2</sup>/(ч·мА) (кривая 1).

Второй способ основан на двух режимах PCLab: CONST и BREMSSTRAHLUNG. В режиме CONST создали файл с необходимыми веществами для моделирования: тантал (материал мишени) и воздух.

В режиме BREMSSTRAHLUNG создали точечный источник электронов энергией 7 МэВ, излучение проходит через мишень толщиной 0,6 мм и воздух 1 м. В файле результатов найдена строчка: угловое распределение мощности дозы в воздухе на расстоянии 1 м от источника тормозного излучения для тока пучка 1 мА; это значение равняется  $\dot{D}_{H2} = 1,42 \cdot 10^4$  Гр·м<sup>2</sup>/(ч·мА). На рисунке 4.2 синяя линия представляет собой экспоненциальную линию тренда, величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9824$ .

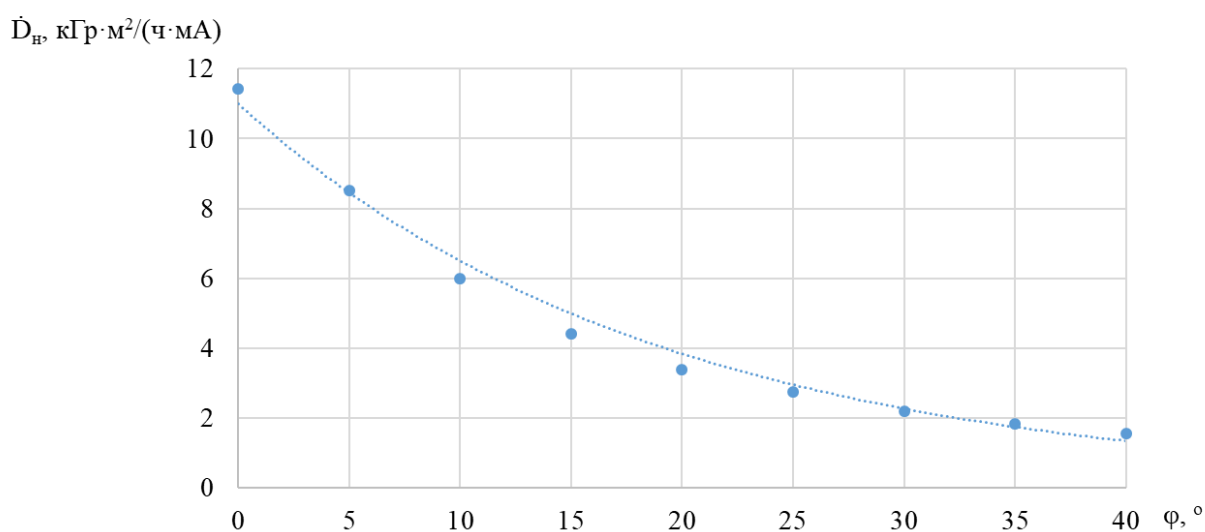


Рисунок 4.2 – Угловое распределение мощности поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от источника тормозного излучения тока пучка 1 мА

Нашли ток непрерывного потока электронов по формуле:

$$I = \frac{\dot{D}}{\dot{D}_H} = \frac{[\text{Гр} \cdot \text{м}^2 / \text{ч}]}{[\text{Гр} \cdot \text{м}^2 / (\text{ч} \cdot \text{мА})]} = [\text{мА}]. \quad (23)$$

Ток составляет 0,65 мкА и 0,42 мкА 1 и 2 способом соответственно.

Необходимо учесть, что источник является импульсным. Ампер – это кулон на секунду; рассматриваем 1 с, в течение которой генерируется 320 импульсов ( $\nu = 320 \text{ Гц} = 320 \text{ с}^{-1}$ ); заряд электрона  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл/частицу}$ .

Нашли количество электронов (частиц) в импульсе:

$$N = \frac{I}{\nu \cdot q} = \frac{[\text{Кл/с}]}{[\text{с}^{-1}] \cdot [\text{Кл/частицу}]} = [\text{частицу}]. \quad (24)$$

Количество частиц  $1,27 \cdot 10^{10}$  и  $8,2 \cdot 10^9$  1 и 2 способом соответственно.

В режиме BARRIER был задан источник электронов энергией 7 МэВ и воздух протяженностью 1 м. Получена доза, нормированная на 1 частицу, которая равняется  $D = 3,52 \cdot 10^{-14} \text{ Гр}$ .

Мощность дозы в пучке от электронов:

$$\dot{D} = N \cdot D \cdot \nu = [\text{частицу}] \cdot [\text{Гр/частица}] \cdot [\text{с}^{-1}] = [\text{Гр/с}]. \quad (25)$$

Мощность дозы в пучке от электронов 8,58 Гр/мин и 5,5 Гр/мин 1 и 2 способом соответственно, первым способом значение больше.

Сравнивая мощности дозы в пучке от электронов двух бетатронов с энергиями электронов 6 МэВ и 7 МэВ, видим, что у бетатрона с энергией электронов 7 МэВ мощность дозы больше, что согласуется с теорией, так как у него больше полная энергия.

Также в режиме BREMSSTRAHLUNG были заданы углы и получены значения азимутального распределения доз, таблица 4.3.

Таблица 4.3 – Азимутальное распределение доз бетатрона с энергией электронов 7 МэВ, приведенных к 1 ч работы на расстоянии 1 м при помощи модели

$\varphi, ^\circ$	Доза, Зв
0	6,51
5	4,86
10	3,42
15	2,52
20	1,94
25	1,57
30	1,26
35	1,05
40	0,883
45	0,108

### Продолжение таблицы 4.3

50	$1,46 \cdot 10^{-3}$
55	$9,68 \cdot 10^{-4}$
60	$6,71 \cdot 10^{-4}$
65	$4,88 \cdot 10^{-4}$
70	$3,01 \cdot 10^{-4}$
75	$2,03 \cdot 10^{-4}$
80	$1,39 \cdot 10^{-4}$
85	$5,38 \cdot 10^{-5}$
89	$8,4 \cdot 10^{-6}$

Сравнивая таблицы 3.5 и 4.3, можно заметить различия, которые обусловлены некоторыми факторами: значения дозы возле пучка в модели больше, чем измеренные значения, так как в модели не предусмотрены элементы защиты корпуса бетатрона, которые замедляют излучение; значения после 50° в модели много меньше измеренных, так как моделирование показывает дозу только от тормозного излучения, а в настоящей жизни присутствует еще рассеянное излучение.

#### **Выводы по главе**

Была рассчитана толщина защиты из свинца для бетатрона с энергией электронов 7 МэВ двумя способами. Диапазон толщины защиты из свинца первым способом составил от 49,1 до 79,3 мм, а вторым от 47,9 до 116 мм.

Также была рассчитана мощность дозы в пучке от электронов для бетатрона с энергией электронов 7 МэВ двумя способами, которая составила 8,58 Гр/мин и 5,5 Гр/мин. Сравнивая её с мощностью дозы в пучке от электронов бетатрона МИБ-6Э от 4 до 7 Гр/мин, видим, что у бетатрона с энергией электронов 7 МэВ мощность дозы больше, что согласуется с теорией, так как у него больше полная энергия.

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

На сегодняшний день перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности 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.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Главной целью выпускной квалификационной работы является исследование интенсивности дозовых полей бетатрона с энергией электронов 7 МэВ. В ходе выполнения работы выявлены основные особенности дозиметрии импульсных пучков ионизирующего излучения. Проведен анализ исследований о методах и приборах, которые возможно использовать в полях импульсных излучений. Разработана схема проведения дозиметрического контроля бетатрона с энергией электронов 7 МэВ, проведен радиационный контроль установки.



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

### **5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Так как мы предоставляем услугу по исследованию интенсивности дозовых полей бетатрона, то заказчиком может являться только государственное учреждение. Чтобы владеть источником ионизирующего излучения необходимо специальное разрешение, поэтому данную услугу не будут заказывать простые граждане, а только организации, имеющие лицензию от государства.

Поэтому выбран сегмент рынка B2G, он обозначает сферу взаимоотношений между бизнесом и государственными органами и учреждениями. Отношения в этом секторе четко регламентированы законодательством каждой страны, и основанные на госзакупках. Каждый шаг частного сектора строго регулируются и проверяется: процедуры закупок, возможности и ограничения.

В данной дипломной работе был выбран заказчик научно-исследовательский институт Онкологии Томского национального исследовательского медицинского центра.

В будущем данную услугу можно предоставлять как по всей территории Томска, так и в ближайших областях. Заказчиками могут являться различные лаборатории и медицинские центры, имеющие источники ионизирующего излучения.

### **5.1.2 Анализ конкурентных технических решений**

Главный инструмент для проведения исследования интенсивности дозовых полей на бетатроне является дозиметр. Мы использовали дозиметр ДКС-АТ5350/1, подходящий для импульсного излучения, но также можно

использовать другие дозиметры, поэтому мы возьмем ДКС-АТ1123 и ДКС-96 в виде конкурентов 1 и 2 соответственно [11].

Для оценки и сравнения ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведены следующие критерии (таблица 5.1), которые позволяют учитывать технические, эксплуатационные и экономические характеристики разработки.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (26)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

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

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таблица 5.1 – Сравнение конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические и эксплуатационные критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Диапазон измерений	0,2	5	4	4	1,0	0,8	0,8
2. Помехоустойчивость	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,4
3. Энергоэкономичность	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
4. Надежность	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
5. Простота эксплуатации	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,4
6. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,1	5	1	5	0,5	0,1	0,5
7. Ремонтпригодность	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
2. Цена	0,05	3	5	4	0,15	0,25	0,2
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
4. Послепродажное обслуживание	0,05	5	4	5	0,25	0,2	0,25
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>52</b>	<b>46</b>	<b>48</b>	<b>4,85</b>	<b>4,05</b>	<b>4,25</b>

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что использованный дозиметр является наиболее подходящим для данных видов работ, имея при этом конкурентоспособность на рынке.

### 5.1.3 SWOT-анализ

Была сформирована матрица SWOT (таблица 5.2), в которой описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта.

Таблица 5.2 – Матрица SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Ясная методика получения и обработки данных. С2. Экологичность технологии. С3. Экономичность и энергоэффективность технологии. С4. Безопасность технологии. С5. Подстраиваемый график.	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1. Требуется высокая квалификация специалистов. Сл2. Высокие требования к дозиметрам. Сл3. Эксперименты имеют погрешности.
<b>Возможности:</b> В1. Востребованность данного исследования в научном сообществе. В2. Увеличение спроса на использовании в производстве и медицине. В3. Уменьшение затрат на проведение дозиметрического контроля на стадии планирования помещений, где содержатся установки, генерирующие ионизирующее излучение.	При выполнении первого заказа, возрастет востребованность на услугу. Заявленные экономичность, энергоэффективность, экологичность и безопасность обеспечат появление дополнительного спроса на использовании в производстве и медицине. Также экономичность и энергоэффективность обеспечивают снижение затрат на проведение дозиметрического контроля и на стадии планирования помещений, где содержатся установки, генерирующие ионизирующее излучение. А безопасность и ясная методика получения данных позволят новой технологии выйти на рынок.	Увеличение спроса на технологию в производстве и медицине позволит увеличить количество высоко квалифицированных специалистов в данной области, поскольку на них также возрастет спрос. Востребованность данного исследования принесет доход, и на эти деньги можно заказать лучшую измерительную технику.
<b>Угрозы:</b> У1. Низкий коммерческий интерес к технологии. У2. Присутствие конкурентов и более ранний их выход на рынок.	Заявленные экономичность и безопасность технологии смогут повысить коммерческую заинтересованность в технологии. По сравнению с конкурентами возможен гибкий график, подстраиваемый под заказчика.	Предъявлять высокие требования к квалификации специалистов и экспериментальному оборудованию.

Чтобы заполнить пересечения ячеек таблицы 5.2, была построена интерактивная матрица проекта (таблицы 5.3). Где каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 5.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	+	+	+
	B2	+	+	+	+	+
	B3	0	0	+	0	-

Согласно матрице SWOT-анализа, были определены сильные стороны проекта, которые обусловлены экономичностью и безопасностью технологии, также гибким графиком работы. Однако у данной технологии имеется слабая сторона – необходимость в высококвалифицированных специалистах и высокоточной технике. Так как в настоящее время интерес к установкам, генерирующим ионизирующее излучение, только возрастает, данная услуга обладает большими возможностями и конкурентоспособностью.

Услуга по исследованию интенсивности дозовых полей бетатрона с энергией электронов 7 МэВ, дает старт для выхода на рынок, благодаря ей была разработана ясная методика получения и обработки данных.

## 5.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;

- построение графика проведения научных исследований.

Используется метод линейного планирования и управления, результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 5.4. В работе присутствуют два исполнителя: руководитель (доцент кандидат наук) и инженер низкой квалификации (дипломник).

Таблица 5.4 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	2	Обзор научной литературы, выбор методов исследования	Инженер
	3	Календарное планирование работ	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Планирование эксперимента, тестовое измерение	Руководитель, Инженер
	5	Измерение дозовых характеристик поля излучения бетатрона	Инженер
	6	Проведение моделирования распределения интенсивности дозовых полей бетатрона	Инженер
Обобщение и оценка результатов	7	Обработка полученных данных	Инженер
	8	Оценка правильности полученных результатов	Руководитель, Инженер
Оформление отчета	9	Составление пояснительной записки	Инженер

### 5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы.

Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (27)$$

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

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дни;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой  $i$ -ой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (28)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

### 5.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (29)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$k_{\text{кал}}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 114 - 8} = 1,5 \quad (30)$$

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

$T_{\text{вых}}$  – общее количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – общее количество праздничных дней в году.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{min}$ , чел-дни	$t_{max}$ , чел-дни	$t_{ожн}$ , чел-дни		
1	2	3	4	5	6
1. Составление и утверждение технического задания	10	13	11,2	11,2	17
2. Обзор научной литературы, выбор методов исследования	12	14	12,8	12,8	20
3. Календарное планирование работ	5	8	6,2	6,2	10
4. Планирование эксперимента, тестовое измерение	28	49	36,4	18,2	28
5. Измерение дозовых характеристик поля излучения бетатрона	6	8	6,8	6,8	11
6. Проведение моделирования распределения интенсивности дозовых полей бетатрона	12	14	12,8	12,8	20
7. Обработка полученных данных	12	14	12,8	12,8	20
8. Оценка правильности полученных результатов	11	14	12,2	6,1	10
9. Составление пояснительной записки	3	6	4,2	4,2	7
<b>Итого</b>	<b>99</b>	<b>140</b>	<b>115,4</b>	<b>91,1</b>	<b>143</b>

В данной работе рассматривается два исполнения в зависимости от выбранного дозиметра. Поэтому различия будут заметны только в бюджете, в статьях, связанных с расходами на оборудование, а вот календарный план от выбора дозиметра не изменится, поэтому остается неизменным, как и расходы на заработную плату исполнителей, которые будут рассчитаны в следующих подразделах.

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 5.6). Используется

цветовая легенда для исполнителей: желтый цвет – руководитель; зеленый цвет – инженер; синий цвет – совместная работа руководителя и инженера.

Таблица 5.6 – Диаграмма Ганта

№ раб	Вид работ	Исполнитель	Т <sub>кi</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				январь			февраль			март			апрель			май			
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руковод.	17	■	■														
2	Обзор научной литературы, выбор методов исследования	Инженер	20		■	■													
3	Календарное планирование работ	Руковод.	10			■													
4	Планирование эксперимента, тестовое измерение	Руковод., Инженер	28				■	■	■										
5	Измерение дозовых характеристик поля излучения бетатрона	Инженер	11								■								
6	Проведение моделирования распределения интенсивности дозовых полей бетатрона	Инженер	20									■	■						
7	Обработка полученных данных	Инженер	20											■	■				
8	Оценка правильности полученных результатов	Руковод., Инженер	10															■	
9	Составление пояснительной записки	Инженер	7																■

#### 5.2.4 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования (НТИ) учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;



- основная заработная плата исполнителей;
- дополнительная заработная плата исполнителей;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

#### 5.2.4.1 Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ

Для выполнения услуги по исследованию интенсивности дозовых полей на бетатроне необходимо иметь дозиметр и ПЭВМ. Поэтому были приобретены данные специальные оборудования в количестве 1 шт. каждого, стоимость товаров указана в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Расчет бюджета затрат на приобретение специального оборудования для экспериментальных работ

№ п/п	Наименование оборудования		Стоимость оборудования, тыс. руб.	
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
1	Дозиметр ДКС-АТ5350/1	Дозиметр ДКС-АТ1123	350	200
2	Ноутбук Digma Eve 11 C409 [21]		15	
<b>Итого</b>			<b>365</b>	<b>215</b>

#### 5.2.4.2 Основная заработная плата исполнителей

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (31)$$

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн. (таблица 5.5).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (32)$$

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

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная рабочая неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 5.8).

Так как и руководитель, и инженер работают 6-дневную рабочую неделю, то и баланс рабочего времени у них будет одинаков.

Таблица 5.8 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Исполнитель
Календарное число дней	365
Количество нерабочих дней	
– выходные дни	114
– праздничные дни	8
Потери рабочего времени	
– отпуск	48
– невыходы по болезни	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	195

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (33)$$

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

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

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;

$k_p$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 5.9 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители	$Z_{tc}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	35120	0,3	0,2	1,3	68484	3653	41,7	152330
Инженер	17890				34886	1861	73,7	137156
<b>Итого</b>								<b>289486</b>

### 5.2.4.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (34)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

Дополнительная заработная плата руководителя и инженера равна 22850 руб. и 20573 руб. соответственно, а общая дополнительная заработная плата равна 43423 руб.

Так как заработная плата складывается из основной и дополнительной, то заработная плата для руководителя и инженера равна 175180 руб. и 157729 руб. соответственно, а заработная плата для двоих исполнителей  $Z_{зп} = 332909$  руб.

#### **5.2.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)**

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{зп}, \quad (35)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды, равен 0,302.

Отчисления во внебюджетные фонды руководителя и инженера равны 52904 руб. и 47634 руб. соответственно, а общие отчисления для двоих исполнителей  $Z_{внеб} = 100538$  руб.

#### **5.2.4.5 Накладные расходы**

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые расходы и т.д.

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 4) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (36)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы, равен 0,16.

Затраты на накладные расходы для исполнения 1:  $Z_{\text{накл}} = 127752$  руб.

Затраты на накладные расходы для исполнения 2:  $Z_{\text{накл}} = 103752$  руб.

#### 5.2.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

В ходе выполнения дипломной работы не были предусмотрены командировки и выполнение задач сторонними организациями, следовательно, не были рассчитаны затраты на научные и производственные командировки и контрагентные расходы. Также не были рассчитаны материальные затраты, а затраты на канцелярию были учтены в накладных расходах.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости дипломной работы по форме, приведенной в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		Примечание
		Исп.1	Исп.2	
1	Затраты на специальное оборудование	365000	215000	Пункт 5.2.4.1
2	Основная заработная плата	289486		Пункт 5.2.4.2
3	Дополнительная заработная плата	43423		Пункт 5.2.4.3
4	Отчисления во внебюджетные фонды	100538		Пункт 5.2.4.4
5	Накладные расходы	127752	103752	Пункт 5.2.4.5
<b>Бюджет затрат</b>		<b>926199</b>	<b>752199</b>	Сумма ст. 1-5

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (37)$$

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

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

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

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

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

$$I_{\text{pi}} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i, \quad (38)$$

где  $I_{\text{pi}}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -ого варианта исполнения;

$a_i$  – весовой коэффициент для  $i$ -ого варианта исполнения;

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -ого варианта исполнения, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Диапазон измерений	0,3	5	4
2. Помехоустойчивость	0,2	5	4
3. Энергосбережение	0,1	4	5
4. Надежность	0,2	5	4
5. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,2	5	1
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>4,9</b>	<b>3,5</b>

Был высчитан интегральный показатель ресурсоэффективности по формуле (38) для исполнения 1 и 2 соответственно:

$$I_{p1} = 0,3 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 = 4,9;$$

$$I_{p2} = 0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 1 = 3,5.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{испi}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{испi} = \frac{I_{pi}}{I_{финрi}}. \quad (39)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 5.12) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}}. \quad (40)$$

Таблица 5.12 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,8
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,9	3,5
3	Интегральный показатель эффективности	4,9	4,4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,11	

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

Так как сравнительная эффективность проекта составила 1,11, то, следовательно, исполнение 1 имеет большую эффективность по сравнению с исполнением 2. В данной работе использовалось оборудование из первого исполнения.

## 5.4 Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

- определен рынок, на котором востребована предоставляемая услуга.
- проведенный анализ конкурентов показал, что купленный дозиметр имеет наиболее выигрышные качества, имея при этом конкурентоспособность на рынке.

- в ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определены дни из календарного плана, когда и сколько работает руководитель и инженер.

- для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 926199 руб.

- исходя из полученных данных и проведенного анализа эффективности, можно сделать вывод, что выбранный вариант исполнения является наиболее эффективным с позиции ресурсоэффективности.

В выполненной выпускной квалификационной работе были достигнуты экономические и технические критерии эффективности за счет функциональных возможностей разработки, а также социальные за счет востребованности такой технологии на рынке.

## **6 Социальная ответственность**

Главной целью выпускной квалификационной работы является исследование интенсивности дозовых полей бетатрона с энергией электронов 7 МэВ, который находится в ТПУ корпусе № 18 в Бункере № 2. В ходе выполнения работы выявлены основные особенности дозиметрии импульсных пучков ионизирующего излучения. Проведен анализ исследований о методах и приборах, которые возможно использовать в полях импульсных излучений. Разработана схема проведения дозиметрического контроля бетатрона с энергией электронов 7 МэВ, и проведен радиационный контроль установки.

Данный раздел посвящен анализу вредных и опасных факторов производственной среды для операторов ПЭВМ, а также при работе с установками, генерирующими ионизирующее излучение. Также будут решены вопросы обеспечения защиты от них на основе требований действующих нормативных документов.

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

Трудовой кодекс РФ осуществляет регулирование отношений между работником и работодателем, которые касаются продолжительности рабочего дня, предоставления отпусков, оплат труда и т.д.

Продолжительность рабочего дня устанавливается согласно трудовому договору, однако не должна превышать 40 часов в неделю. При работе с вредными или опасными условиями труда длительность рабочего дня составляет 8 часов (при 36-часовой рабочей неделе) и 6 часов (при 30-часовой рабочей неделе). В ночное время продолжительность смены сокращается на 1 час. Каждому работнику должен быть предоставлен перерыв во время рабочего дня не менее 30 минут, но не более 2 часов, который не включается в рабочее время.



Каждому работнику предоставляется отпуск в 28 календарных дней. При работе с вредными или опасными условиями труда предоставляются дополнительные отпуска [22].

## 6.2 Производственная безопасность

Для обеспечения производственной безопасности необходимо проанализировать воздействия на человека вредных и опасных производственных факторов, которые могут возникать при разработке или эксплуатации проекта.

В таблице 6.1 приведены основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Таблица 6.1 – Возможные опасные и вредные факторы на рабочем месте

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1. Микроклимат	СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование
2. Радиационная безопасность	СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 СанПиН 2.6.1.2573-10 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ СанПиН 2.1.7.1322-03 Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления
3. Вентиляция	ГОСТ 32548-2013 Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Общие технические условия
4. Шум	ГОСТ 12.1.029-80 Средства и методы защиты от шума
5. Освещенность рабочей зоны	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
6. Электробезопасность	ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов в (с Изменением № 1) СанПиН 2.2.2/2.5.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
7. Пожароопасность	СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643) ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования

В следующих подразделах к этой главе пойдет речь об анализе опасных и вредных производственных факторов.

### **6.2.1 Микроклимат**

Основными показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются: температура воздуха; температура поверхностей; относительная влажность воздуха; скорость движения воздуха; интенсивность теплового облучения.

ПЭВМ, вспомогательная техника, а также приборы освещения в процессе работы выделяют тепло. Высокая температура способствует быстрой утомляемости и перегреву организма при нахождении в непосредственной близости от источников тепла. Влажность также оказывает значительное влияние на терморегуляцию человека, так низкая влажность может привести к высыханию кожи, слизистых оболочек и общему обезвоживанию организма, а высокая – к повышенной отдаче тепла и возможному перегреву организма [23].

Для поддержания данных санитарных норм необходимо иметь местный кондиционер установки полного кондиционирования воздуха, обеспечивающий постоянство температуры, относительной влажности, скорости движения и чистоты воздуха. Необходима система центрального водяного отопления, обеспечивающая заданный уровень температуры в зимний период. При устройстве системы вентиляции и кондиционирования воздуха в помещении лаборатории необходимо соблюдать определенные требования пожарной безопасности [24].

В таблице 6.2 приведены оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах, которые установлены санитарными нормами для различных категорий работ в разные периоды года. При работе за ПЭВМ категория работ является легкой (Ia), поскольку не возникает систематических физических нагрузок [23].

Таблица 6.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22-24	21-25	60-40	не более 0,1
Теплый	Ia (до 139)	23-25	22-26	60-40	не более 0,1

В Бункере № 2 выполняются нормативы по микроклимату.

### 6.2.2 Радиационная безопасность

Основным источником ионизирующего излучения в рабочем помещении является бетатрон с энергией электронов 7 МэВ.

В таблице 6.3 приведены основные пределы доз. Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни воздействия персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А [16].

Таблица 6.3 – Основные пределы доз

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза в год в – хрусталике глаза – коже – кистях и стопах	150 мЗв 500 мЗв 500 мЗв	15 мЗв 50 мЗв 50 мЗв

Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий.

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) – 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв. Началом периодов считается 1 января 2000 года.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками излучения, вводятся дополнительные ограничения: эквивалентная доза на

поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв в месяц, а поступление радионуклидов в организм за год не должно быть более 1/20 предела годового поступления для персонала. На период беременности и грудного вскармливания ребенка женщины должны переводиться на работу, не связанную с источниками ионизирующего излучения.

Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б.

Для защиты от воздействия ионизирующих излучений на организм используются следующие три метода: защита количеством, временем и расстоянием. К числу основных профилактических мероприятий относятся правильный выбор планировки помещений, оборудования, отделки помещений, технологических режимов, рациональная организация рабочих мест, соблюдение мер личной гигиены работающими, рациональные системы вентиляции, защиты от внешнего и внутреннего облучения, сбора и удаления радиоактивных отходов, а также использование средств индивидуальной защиты [16].

В ходе выполнения дипломной работы была измерена мощность дозы в пультовой Бункера № 2. Мощность дозы не превысило показания фона 0,28 мкЗв/ч, также не превышает ДМД для персонала группы А 6 мкЗв/ч. К IV категории относятся объекты, радиационное воздействие от которых при аварии ограничивается помещениями, где проводятся работы с источниками излучения, к таким объектам относится Бункер № 2.

При взаимодействии ионизирующего излучения с воздухом образуется ряд токсических веществ, превышение концентрации которых может представлять опасность для здоровья человека. Для уменьшения концентрации токсических веществ рассчитывают и устанавливают специальную вытяжную вентиляцию. Необходимо учитывать, что при работе электронного ускорителя в основном образуется озон, соответственно, расчет вентиляции проводится по выбросам озона [15].

Если защита ускорителя выполнена правильно, то действие его вредных факторов на окружающую среду минимально. Объём Бункера № 2 составляет  $V = 123,48 \text{ м}^3$ , кратность воздухообмена в помещении  $K = 10 \text{ ч}^{-1}$ , что соответствует норме по [15].

### 6.2.3 Вентиляция

Для поддержания санитарных норм достаточно иметь естественную неорганизованную вентиляцию помещения и местный кондиционер установки полного кондиционирования воздуха, обеспечивающий постоянство температуры, относительной влажности, скорости движения и чистоты воздуха [25].

Для расчёта производительности воздухообмена вентилятора в лаборатории воспользуемся формулой:

$$W = V \cdot K . \quad (41)$$

Подставляя известные значения в формулу, получим  $W = 1235 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ . Исходя из имеющихся критерий, подойдёт вихревая воздуходувка VARP Alpha 1370x110 с максимальной производительностью  $1370 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$  [26].

### 6.2.4 Шум

Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях – к глухоте. Шумовое загрязнение среды на рабочем месте неблагоприятно воздействует на работающих: снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В результате снижается производительность труда и качество выполняемой работы.

При превышении уровня шума наиболее эффективны мероприятия, ведущие к снижению шума в источнике его возникновения. Коллективные средства защиты от шума: звукоизоляция и глушители.

Для оценивания шумовой обстановки допускается использовать числовую характеристику, называемую уровнем звука (измеряется в дБ). Допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях с шумным оборудованием, составляет 80 дБ [27].

За рабочей поверхностью уровень шума при работающем ноутбуке Acer достигает значения 30 дБ, что находится в пределах нормы. Бетатрон находится за толстостенной свинцовой дверью, поэтому шум от работы вакуумного насоса не доходит. Уровень шума от вихревой воздуходувки составляет 75 дБ.

### **6.2.5 Освещенность рабочей зоны**

Недостаточная освещенность рабочей зоны также считается одним из факторов, влияющих на работоспособность человека. Для промышленных предприятий оптимальная освещенность территории и помещений является важной и непростой технической задачей, решение которой обеспечивает нормальные гигиенические условия для работающего персонала. Правильно подобранные источники света и их проектирование создают условия для производственного труда, корректности выполнения технологических операций, соблюдения правил и техники безопасности.

Внутри помещений по способу размещения светильников и распределению освещенности различают следующие системы искусственного освещения: общее и комбинированное.

Общим называется освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения, как занятую оборудованием или рабочими местами, так и вспомогательную. В зависимости от расположения светильников различают равномерное и локализованное общее освещение. При общем равномерном освещении светильники располагаются в верхней зоне помещения равномерно, обеспечивая тем самым одинаковую освещенность всего помещения. Оно

применяется, как правило, когда расположение рабочих зон при проектировании неизвестно либо при гибкой планировке. При общем локализованном освещении светильники размещают с учетом расположения технологического оборудования, создавая на отдельных поверхностях требуемый уровень освещения.

Комбинированная система освещения состоит из общего и местного освещения. Общее освещение предназначено для освещения проходов и участков, где работы не производятся, а также для выравнивания яркости в поле зрения работающих. Местное освещение обеспечивается светильниками, располагаемыми непосредственно на рабочих местах. Ему следует отдавать предпочтение, если в нескольких рабочих зонах помещения должны решаться различные зрительные задачи и поэтому для них требуются различные уровни освещенности. Оно также необходимо, когда рабочие места территориально отдалены друг от друга. При этом следует иметь в виду, что устройство только местного освещения недопустимо, так как оно создает большую разность освещенности рабочих поверхностей и окружающего пространства, что неблагоприятно сказывается на зрении.

Причинами недостаточности естественного и искусственного освещений являются отдаленность рабочего места от источников освещения, недостаточная мощность и некачественность источников освещения, неподходящие погодные факторы или время суток. Недостаточность освещения снижает производительность труда, увеличивает утомляемость и количество допускаемых ошибок, а также может привести к появлению профессиональных болезней зрения [28].

Необходимая освещенность на рабочем месте достигается за счет искусственного освещения люминесцентными лампами. Посчитаем необходимое число светильников по формуле:

$$n = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot K}{F \cdot U \cdot m}, \quad (42)$$

где  $E$  – нормированная освещенность,  $E = 300$  лк;

$S$  – площадь помещения,  $S = 29,4 \text{ м}^2$ ;

$Z$  – поправочный коэффициент светильника,  $Z = 1,2$ ;

$K$  – коэффициент запаса, учитывающий снижение освещенности при эксплуатации,  $K = 1,2$ ;

$F$  – световой поток одной лампы, ЛД 40,  $F = 2130 \text{ лк}$ ;

$U$  – коэффициент использования,  $U = 0,55$ ;

$m$  – число ламп в светильнике,  $m = 2$ .

Подставив значения получаем  $n = 5,42$ , так как необходимо целое число, то получаем 6 ламп, что соответствует количеству ламп в Бункере № 2.

### 6.2.6 Электробезопасность

Источниками опасного фактора являются токопроводящие кабели, элементы электрооборудования. Опасность поражения электрическим током усугубляется тем, что человек не в состоянии без специальных приборов обнаружить напряжение дистанционно. Электрический ток, проходя через живой организм оказывает термическое (ожоги, нагрев и повреждение кровеносных сосудов, перегрев сердца, мозга и других органов), электролитическое (разложение органической жидкости, в том числе крови, что вызывает значительное нарушение ее состава, а также ткани в целом) и биологическое действие (нарушение внутренних биоэлектрических процессов, свойственных нормально действующему организму и теснейшим образом связанных с его жизненными функциями).

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений.

Для оператора ПЭВМ при работе с электрическим оборудованием обязательны следующие меры предосторожности:

- перед началом работы нужно убедиться, что выключатели и розетка закреплены и не имеют оголенных токоведущих частей;



– при обнаружении неисправности оборудования и приборов необходимо сообщить сотруднику, ответственному за оборудование [29].

В рамках текущей работы не производились контакты с открытыми источниками электрического тока. Ток, протекающий в компьютерной периферии, не представляет существенной опасности для здоровья человека. Бетатрон работает от питания 220 В переменного тока. Бункер № 2 подходит под помещения 1 класса, в котором рабочие напряжения не превышают 1000 В.

Также компьютер несет в себе опасность не только электрического тока, но и вредный фактор электромагнитного излучения. Основными источниками электромагнитных излучений в рабочих помещениях являются дисплеи компьютеров и мобильных устройств, сеть электропроводки, системный блок, блоки питания, дисплеи дозиметрических приборов. Воздействие электромагнитного излучения может привести к нарушению функций сердечно-сосудистой, дыхательной и нервной систем, а также пищеварительного тракта, изменению состава крови. В таблице 6.4 приведены допустимые уровни параметров электромагнитных полей [30].

Таблица 6.4 – Временные допустимые уровни электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

	Наименование параметров	Допустимые значения
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 Кв/м

Необходимо использовать технику, удовлетворяющую нормам и правилам сертификации, чтобы максимально исключить негативное воздействие электромагнитных излучений. Также можно использовать различные фильтры и экраны для защиты человека, работающего за ПЭВМ.

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 [30].

В Бункере № 2 излучение соответствует нормам, экран монитора ПЭВМ находится на безопасном расстоянии.

### **6.2.7 Пожаробезопасность**

В зависимости от характеристик веществ и материалов, находящихся в помещении, по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г и Д в соответствии с [31]. Рассматриваемое помещение относится к категории ВЗ, так как в нем содержатся твердые горючие вещества в холодном состоянии. Возможные причины возгорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоках питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности.

В целях снижения риска возникновения пожара и минимизации возможного ущерба производятся профилактические мероприятия, которые подразделяются на организационно-технические, эксплуатационные и режимные. Организационно-технические мероприятия заключаются в проведении регулярных инструктажей сотрудников ответственным за пожарную безопасность, обучении сотрудников надлежащей эксплуатации оборудования и необходимым действиям в случае возникновения пожара, паспортизацию веществ, материалов и изделий в части обеспечения пожарной безопасности, изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности. К эксплуатационным мероприятиям относят профилактические осмотры оборудования. Мероприятия режимного характера включают установление правил организации работ и соблюдение

противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- содержание помещений в соответствии с требованиями пожарной безопасности;
- надлежащая эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электропитания, контроль нагрева оборудования);
- обучение производственного персонала правилам пожарной безопасности;
- наличие, правильное размещение и использование средств пожаротушения.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Данные огнетушители предназначены для тушения загораний различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В, горючих жидкостей. Химические и пенные огнетушители не допустимы. Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов. Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара [32].

### **6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде,

значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. Есть два вида чрезвычайных ситуаций:

- техногенная;
- природная.

К техногенным ЧС можно отнести пожары, взрывы, диверсии, выбросы ядовитых веществ. К природным ЧС относятся природные катаклизмы. Наиболее вероятной техногенной ЧС являются пожары.

К опасностям несчастного случая относится внезапный и неуправляемый источник энергии: двигающийся предмет, неуправляемое движение или энергия [33].

Рассмотрим возможные аварийные ситуации в ТПУ корпусе № 18 в Бункере № 2, а именно:

- падение с высоты собственного роста;
- удар электрическим током;
- возникновение пожара.

Мероприятия по предотвращению и ликвидации вышеуказанных аварийных ситуаций представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Аварийные ситуации

№	Аварийная ситуация	Мероприятия по предотвращению	Мероприятия по ликвидации последствий аварийной ситуации
1	Падение с высоты собственного роста	1. Содержание помещения в надлежащем порядке. 2. Ограничение рабочего пространства. 3. Своевременное проведение инструктажа.	1. Осмотреть или опросить пострадавшего; 2. если необходимо – вызвать скорую помощь; 3. остановить кровотечение, если оно имеется; 4. если есть подозрение, что у пострадавшего сломан позвоночник (резкая боль в позвоночнике при малейшем движении), необходимо обеспечить пострадавшему полный покой в положении лежа на спине до оказания квалифицированной медицинской помощи.
3	Удар электрическим током	1. Заземление всех электроустановок.	1. Быстро освободить пострадавшего от действия электрического тока; 2. вызвать скорую помощь;

## Продолжение таблицы 6.5

3		2. Ограничение рабочего пространства. 3. Обеспечение недоступности токоведущих частей аппаратуры. 4. Своевременное проведение инструктажа.	3. если пострадавший потерял сознание, но дыхание сохранилось, его следует удобно уложить, расстегнуть стесняющую одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой; 4. пострадавшему надо дать понюхать нашатырный спирт, сбрызнуть лицо водой, растереть и согреть тело; 5. при отсутствии дыхания нужно немедленно делать искусственное дыхание и массаж сердца.
4	Пожар	1. Своевременное проведение инструктажа. 2. Установление средств автоматического пожаротушения в помещениях. 3. Установка датчиков дыма и огня. 4. Обеспечение путей эвакуации и поддержание их в надлежащем состоянии. 4. Контроль работы электроприборов.	1. Обесточить помещение, прекратить поступление воздуха; 2. немедленно сообщить о пожаре дежурному или на пост охраны; 3. по возможности принять меры по эвакуации людей, тушению пожара и спасению материальных ценностей.

В данном подразделе рассмотрены потенциальные аварийные ситуации, которые могут возникнуть при работе в Бункере № 2. Рассмотрены мероприятия по предотвращению и ликвидации последствий этих ситуаций согласно [34].

### 6.4 Выводы по разделу

В разделе рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности работников, выявлены возможные вредные и опасные факторы (микроклимат, ионизирующее излучение, вредные вещества, вентиляция, шум, освещение, электрический ток, электромагнитное излучение, пожароопасность), также проведен их анализ и обоснован ряд мероприятий по снижению их воздействия на исследователя.

В последнем подразделе проанализированы возможные чрезвычайные ситуации. Также описаны мероприятия по их предотвращению и мероприятия по ликвидации последствий аварийных ситуаций. Наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара на рабочем месте вследствие возгорания оборудования.

Работа в плановом режиме в ТПУ корпусе № 18 в Бункере № 2 не принесет вред человеку и окружающей среде. Помещение отнесено к классу В3 по пожароопасности, к 1 категории по электробезопасности (до 1000 В), к IV категории по радиационному воздействию.

## **Заключение**

Была изучена литература про строение бетатронов и их применению в медицине и томографии крупногабаритных объектах. Также изучены дозиметрические приборы, предназначенные для измерения импульсных дозовых полей излучения, такие как ДКС-АТ1123 и ДКС-АТ5350/1.

Были измерены и исследованы распределения интенсивности дозовых полей тормозного излучения, генерируемых бетатронами с энергиями электронов 6 МэВ, 4 МэВ и 7 МэВ. Погрешность измерений с помощью ДКС-АТ5350/1 с камерой ТМ30001-10 дозы составила 3 %.

Была проведена оценка радиационной безопасности при использовании малогабаритного импульсного бетатрона в НИИ Онкологии Томского НИМЦ двумя способами.

Была рассчитана мощность дозы излучения, генерируемая электронным пучком малогабаритного бетатрона НПЛ БТКО двумя способами.

## **Вывод**

С точки зрения дозиметрического контроля бетатрон НПЛ можно использовать взамен МИБ-6Э при условии создания биологической защиты из свинца переменной толщины в зависимости от способа расчета:

- от 49,1 до 79,3 мм;
- от 47,9 до 116 мм.

Мощность дозы в пучке электронов бетатрона с энергией электронов 7 МэВ составила в зависимости от способа расчета 5,5 Гр/мин или 8,58 Гр/мин, что согласуется с предоставленными данными НИИ Онкологии о мощности дозы МИБ-6Э: от 4 до 7 Гр/мин в зависимости от применяемого коллиматора.



## Список использованных источников

1. Москалев В. А. Бетатроны: монография. / В. А. Москалев, В. Л. Чахлов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 267 с. – ISBN 978-5-98298-570-5.
2. Интраоперационная лучевая терапия: реальность и перспектива / В. А. Новиков, Р. В. Васильев, Е. Л. Чойнзонов [и др.]. // Злокачественные опухоли. – 2017. – Том 7. – № 3S1. – С. 35-40.
3. Малогабаритный бетатрон для тотального облучения всей поверхности кожи электронным пучком / Дж. Миллз, Г. Бо, Дж. Маклеод [и др.]. // Сибирский онкологический журнал. – 2010. – № 4. – С. 34-38.
4. Бетатрон на энергию 10 МэВ с электронным пучком для лучевой терапии / В. Л. Чахлов, А. А. Филимонов, М. М. Штейн [и др.]. // Известия ТПУ. – 2008. – Том 312. – № S2. – С. 358-360.
5. Бетатронный томограф для неразрушающего контроля изделий из высокоэнергетических материалов диаметром до 1000 мм / В. П. Карих, А. В. Кодолов, А. А. Охотников [и др.]. // Дефектоскопия. – 2019. – № 4. – С. 56-60.
6. Смолянский В. А. Разработка, исследование и применение микрофокусного источника тормозного излучения на основе малогабаритного бетатрона в рентгенографии и томографии высокого разрешения: дис. / Смолянский Владимир Александрович ; Томский политехнический университет. – Томск, 2019. – 128 с.
7. Мартынюк Ю. Н. Дозиметрия импульсного излучения / Ю. Н. Мартынюк, К. Нурлыбаев, А. А. Ревков // АНРИ. – 2018. – № 1 (92). – С. 2-11.
8. Нурлыбаев К. Аппаратурное, метрологическое и методическое обеспечение измерений направленных эквивалентов доз / К. Нурлыбаев, Ю. Н. Мартынюк, Д. Гинзбург // АНРИ. – 2017. – № 2 (89). – С. 25-31.

9. Титов Н. В. Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного излучения / Н. В. Титов // Радиационная гигиена. – 2019. – №2. – С. 76-80.

10. Гинзбург Д. Ионизационная камера для измерений в полях импульсного фотонного излучения / Д. Гинзбург // АНРИ. – 2017. – № 2 (89). – С. 18-24.

11. ЭкоСфера. – URL: <https://ekosf.ru/> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

12. Степанов Ю. М. Ускорители электронов: методические указания. / Ю. М. Степанов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 116 с. – ISBN 5-98298-389-6.

13. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902214068> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

14. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений: справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 496 с. – ISBN 5-283-03059-8.

15. СанПиН 2.6.1.2573-10. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902199393> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

16. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

17. РМГ 43-2001. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031648> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

18. Беспалов В. И. «Компьютерная лаборатория» (КЛ/PCLab). Описание программы. Руководство по работе с программой (Версия 9.10). /

В. И. Беспалов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 128 с.

19. ГОСТ Р МЭК 60601-2-1-2013. Изделия медицинские электрические. Часть 2-1. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к электронным ускорителям, работающим в диапазоне от 1 до 50 МэВ. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107097> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

20. Беспалов В. И. Лекции по радиационной защите: учебное пособие. – 5-е изд., расшир. / В. И. Беспалов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 695 с. – ISBN 978-5-4387-0786-8.

21. DNS. – URL: <https://www.dns-shop.ru/> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

22. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 30.04.2021). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

23. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901704046> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

24. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035579> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

25. ГОСТ 32548-2013. Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Общие технические условия. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110084> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

26. Воздуходувки.про. – URL: <https://vozduhoduvki.pro/> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

27. ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200292> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

28. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

29. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением № 1). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

30. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901865498> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

31. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

32. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9051953> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

33. Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ (ред. от 26.05.2021) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9009935> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.

34. ГОСТ Р 22.0.02-2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139176> (дата обращения 20.05.2021). – Текст : электронный.