

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

---

Институт – Физико-технический  
Направление подготовки – Ядерные физика и технологии  
Кафедра – Прикладная физика

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Экспериментальное исследование особенностей глубинного распределения поглощенной дозы электронного пучка, измеренной полимерной плёнкой</b>

УДК 621.039.58:615.84.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АЗБ	Кулиева Анжелика Тофиковна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ПФ	Сухих Л.Г.	к. ф.-м. н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

Томск – 2017 г.  
**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт физико-технический  
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии  
 Кафедра прикладная физика

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_ Вагнер А.Р.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

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

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0АЗБ	Кулиевой Анжелике Тофиковне

Тема работы:

Экспериментальное исследование особенностей глубинного распределения поглощенной дозы электронного пучка, измеренной полимерной плёнкой	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2017
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Моделирование в пакете Монте-Карло Fluka в водном фантоме и полимерной плёнке Gafchromic EBТ-3:</p> <p>Энергия электронов: 6 МэВ</p> <p>Диаметры полей: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 мм.</p> <p>Диаметры водного фантома: 1, 3, 5, 10, 15, 20, 50 мм.</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Обзор литературы по клинической дозиметрии электронных пучков;</li> <li>2) Моделирование кривых глубинного распределения поглощенной дозы в водном фантоме и полимерной плёнке;</li> <li>3) Обработка экспериментальных данных;</li> <li>4) Анализ результатов исследования.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Электронная презентация в Power Point</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Гоголева Т.С</p>
<p>Финансовый менеджмент</p>	<p>Меньшикова Е.В.</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент каф. ПФ</p>	<p>Сухих Л.Г.</p>	<p>к.ф. – м.н.</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>0А3Б</p>	<p>Кулиева А.Т.</p>		

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)

### *Планируемые результаты обучения*

Код результата	Результат обучения (компетенции)
<i>Общекультурные компетенции</i>	
Р1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
Р2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
Р3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
Р4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать

	высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-

	экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок,

	электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А3Б	Кулиевой Анжелике Тофиковне

Институт	Физико-технический	Кафедра	ПФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	Ядерные физика и технологии

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

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

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

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

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ	Гоголева Т.С.	канд. физ.-мат. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Б	Кулиева Анжелика Тофиковна		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0АЗБ	Кулиева Анжелика Тофиковна

<b>Институт</b>	<b>ФТ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ПФ</b>
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Затраты на амортизацию оборудования и эл. /энергию 22784 руб. Основная заработная плата исполнителей темы 38058,216 руб. Отчисления во внебюджетные фонды 6238,53 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Тариф на промышленную электроэнергию 5,8 за 1 кВт·ч Районный коэффициент города Томска -1,3
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Размер страховых взносов - 30%. Пониженная ставка - 27,1%.

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

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

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент каф. менеджмента	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0АЗБ	Кулиева Анжелика Тофиковна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 79 с., 22 рис., 16 табл., 13 источников.

Ключевые слова: интраоперационная лучевая терапия, полимерная плёнка, Gafchromic EBТ, клиническая дозиметрия.

Цель работы – исследование величины поглощенной дозы, а также параметров кривой распределения. Измеренных с помощью полимерной плёнки Gafchromic EBТ-3.

В процессе исследования проводились: исследование глубинного распределения поглощенной дозы электронного пучка.

В результате исследования были получены кривые глубинного распределения поглощенной дозы в водном фантоме, и в полимерной плёнке, результаты обработки экспериментальных данных.

Область применения: клиническая дозиметрия электронных пучков.

Лучевая терапия злокачественных новообразований электронными пучками МэВ-ных энергий широко используется в форматах интраоперационной лучевой терапии и реже в формате дистанционной лучевой терапии. Интраоперационная лучевая терапия предполагает облучение опухоли или ложа опухоли в процессе хирургической операции. При этом за один сеанс облучения продолжительностью до 10 минут доставляется поглощенная доза от 10 до 25 Гр. Для данного вида терапии важным является распределение поглощённой дозы по глубине, начиная с поверхности. Использование «золотого стандарта» современной клинической дозиметрии – ионизационных камер, не позволяет точно измерять поглощённую дозу, начиная с поверхности воды из-за конечной толщины водозащитного колпачка (примерно 1,5 мм). Одним из выходов из данной ситуации может быть использование полимерных дозиметрических плёнок, например, семейства Gafchromic EBТ, которые обладают пространственным разрешением лучше, чем 0,1 мм.

Выпускная квалификационная работа выполнена на кафедре «Прикладной физики» ФТИ ТПУ, эксперимент проведен на электронном пучке ускорителя Elekta Synergy.

Работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016 с применением пакета Microsoft Excel 2016, WolframMathematica, а также пакета Монте-Карло моделирования Fluka.

## Оглавление

Введение.....	14
1. Аналитический обзор литературы.....	17
1.1 Интраоперационная лучевая терапия.....	17
1.2. Особенности глубинного дозного распределения.....	21
2. Моделирование дозных распределений.....	25
2.1 Моделирование поглощенной дозы в воде .....	25
2.2 Моделирование поглощенной дозы в чистой воде, измеренной с помощью полимерной плёнки Gafchromic EBТ-3.....	33
2.3 Сравнение результатов моделирования.....	35
3. Экспериментальное исследование глубинного дозного распределения.....	38
3.1. Обработка экспериментальных данных.....	38
3.2 Сравнение результатов моделирования и эксперимента .....	41
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	43
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	43
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования .....	43
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений .....	44
4.1.3. SWOT-анализ.....	46
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	48
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	48
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....	50
4.2.3 Календарный план-график в виде диаграммы Ганта .....	52
4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	54
4.3.1 Основная заработная плата исполнителей темы .....	55
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	61

5. Социальная ответственность .....	64
5.1 Анализ опасных и вредных факторов .....	65
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ .....	66
5.2.1. Организационные мероприятия.....	66
5.2.2. Технические мероприятия.....	67
5.2.3. Условия безопасной работы.....	69
5.3 Электробезопасность .....	72
5.4. Пожарная и взрывная безопасность .....	73
Заключение .....	76
Список использованных источников .....	78

## Введение

Количество случаев онкологических заболеваний увеличивается с каждым годом. Как показывает практика, точного метода лечения нет, а потому для каждого определенного случая используется определенный метод лечения. На данный момент медицина насчитывает следующие методы лечения, как инвазивные, так и неинвазивные.

- хирургическое вмешательство,
- химиотерапевтическое лечение,
- гормональная терапия,
- лучевая терапия.

Наибольшее распространение получил метод лучевой терапии (ЛТ), суть которого заключается в облучении раковых клеток, при сохранении клеток здоровых. В свою очередь, сам метод ЛТ в процессе практики был разделен на несколько, исходя из способа подведения дозы к пораженным тканям:

- 1) дистанционная лучевая терапия;
- 2) контактная лучевая терапия, которая, в свою очередь, делится на:
  - брахитерапию (внутриполостная и внутритканевая лучевая терапия);
  - интраоперационную лучевую терапию (ИОЛТ).

В дистанционной ЛТ в последнее время на передний план выходит протонная терапия, но ввиду высокой стоимости и малого количества установок для протонной терапии, данный метод не получил широкого применения. А потому, в основном, дистанционная ЛТ реализуется с помощью высокоэнергетической фотонной терапии [1].

Интраоперационная ЛТ может быть реализована на основе различных типов излучения, включающих в себя электронное излучение МэВ-ных энергий или низкоэнергетическое рентгеновское.

Для корректного использования интраоперационной лучевой терапии необходимо правильно учесть величину дозы, а также энергию источника

излучения, для того, чтобы максимальное поглощение приходилось на пораженные участки, а здоровые ткани не подвергались воздействию. Потому, в цели и задачи данной работы включены следующие шаги:

### **Задачи:**

1. Изучение литературы, посвященной клинической дозиметрии глубинных распределений относительной поглощённой дозы МэВ-ного электронного пучка.
2. Проведение численного моделирования глубинных распределений поглощённой дозы МэВ-ного электронного пучка в пакетах Fluka.
3. Обработка экспериментально измеренных глубинных распределений дозы электронного пучка с энергиями 6 МэВ и 9 МэВ, полученных на терапевтическом линейном ускорителе Elekta Synergy (ТООД, г. Томск) с использованием полимерных плёнок и ионизационной камеры.

### **Задача 2. Моделирование дозных распределений**

1. Исходные данные: энергия моноэнергетических электронов 6 МэВ, поперечное распределение – равномерное; детекторы: чистая вода, полимерная плёнка Gafchromic EBТ3, плоскопараллельная ионизационная камера. Геометрия расчёта – аксиально-симметричная (RZ). Источник прислонен вплотную к воде. Размеры воды достаточные для полного поглощения исходных электронов (в обоих направлениях).
2. Провести моделирование глубинных распределений поглощённой дозы в воде в зависимости от размера источника электронов (6 МэВ) и размера области детектирования. Диаметры источников: 10 мм, 20 мм, 30 мм, 40 мм, 50 мм, 60 мм, 80 мм, 100 мм, Диаметры детекторов: 1 мм, 3 мм, 5 мм, 10 мм, 15 мм, 20 мм, 50 мм. Задача проанализировать полученные относительные глубинные дозные распределения, сравнить относительные величины дозы на поверхности, положение (абсолютное) дозного максимума.

3. Провести моделирование глубинного распределения относительной поглощённой дозы при измерении полимерной плёнкой Gafchromic EBТ3 в воде для различных размеров полей (см. пред. пункт) при энергиях электронов 6 МэВ. Сравнить полученные распределения, величины дозы на поверхности и положения дозного максимума. Провести сравнения как для разных полей с плёнкой, так и распределениями, полученными в воде.

### **Задача 3.** Обработка экспериментальных данных

1. Обработать полученные ранее экспериментальные данные измерения глубинных распределений поглощённой дозы электронного пучка ускорителя Elekta Synergy с энергиями электронов 6 МэВ, 9 МэВ. Данные были получены с помощью полимерных плёнок Gafchromic EBТ3. Сравнить результаты моделирования и эксперимента.

## **1. Аналитический обзор литературы**

### **1.1 Интраоперационная лучевая терапия**

Интраоперационная лучевая терапия (ИОЛТ) – это метод радиотерапии, суть которого заключается в подведении непосредственно во время хирургического вмешательства однократной высокой дозы ионизирующего излучения при помощи электронного пучка высокоэнергетических ускорителей [1]. При этом глубина проникновения радиации в толщу тканей в зависимости от конкретной ситуации может варьировать в пределах от нескольких миллиметров до четырех сантиметров. ИОЛТ-метод позволяет эффективно облучить объем тканей, соответствующий размерам ложа удаленной опухоли, и избежать негативного воздействия на близрасположенные внутренние органы и другие анатомические структуры [2]. Сразу после резекции злокачественного новообразования хирург и врач-радиотерапевт, определяют зону предполагаемого облучения и, совместно с физиком-радиологом, задают энергию электронного пучка, устанавливая необходимую глубину проникновения и тщательно планируя дозу, которая в самой целевой области достигает 10-22 Гр, уменьшаясь к периферии очага. В ряде случаев интраоперационная радиотерапия может полностью заменить собой постоперационную лучевую терапию либо в значительной мере сократить ей продолжительность. Как подтверждает накопленный клинический опыт, применение ИОЛТ достоверно снижает риск развития рецидива онкозаболевания. Проводится облучение, естественно, однократно, до момента завершения операции. Вот почему, в отличие от фракционированного, т.е. разделенного на несколько сеансов, облучения, здесь специалистами назначается очень доза такой величины. Как правило, такое радиационное воздействие раза в два-три превышает уровень подавления раковых клеток, который достигается при фракционированном

облучении. Таким образом, интраоперационная лучевая терапия с открытым полем дает возможность избавиться от остаточных опухолевых клеток после хирургического удаления новообразования и тем самым повысить контроль над заболеванием. Однако, доза такой величины требует тщательного выбора параметров облучения (энергии излучения, размеры пучка и т.д.). К сожалению, известной методики выбора данных параметров не существует.

На сегодняшний день данный метод применяется специалистами для лечения злокачественных онкопроцессов, локализующихся в молочной железе, легких, в малом тазу, в брюшной полости, на конечностях, а также в полости черепа. При необходимости интраоперационная радиотерапия вполне может быть совмещена с другими консервативными методами: с предоперационной, или неoadъювантной химиотерапией, постоперационной, или адъювантной телетерапией (внешним облучением) или брахитерапией и т.п.

Электронная ИОЛТ (ИОЭЛТ) является наиболее полным, эффективным и быстрым методом интраоперационной лучевой терапии. Совершенствование технологий позволило использовать миниатюрные мобильные линейные ускорители, отличающиеся небольшим весом и простотой обращения, с помощью которых можно быстро проводить облучение пациентов, не перемещая их с операционного стола. Эта технология, используемая как альтернатива или дополнение к традиционной наружной лучевой терапии, предоставляет очевидные клинические, операционные, социальные и экономические преимущества.

Радиобиологическое действие однократной высокой дозы ИОЭЛТ считается примерно в 1,5–2,5 раза большим, чем действие такой же дозы фракционированной лучевой терапии. К примеру, доза 21 Гр эквивалентна фракционированной дозе приблизительно 52 Гр: это дает возможность существенно уменьшить дозу облучения для пациентов, тем самым сокращая число осложнений, связанных с лучевой терапией [3].

Согласно опубликованной литературе и данным, представленным на Всемирном конгрессе Международного общества интраоперационной лучевой терапии (ISIO<sub>RT</sub>) 10–13 июня 2008 г. в Мадриде, применение ИОЛТ рекомендуется при таких заболеваниях:

- опухоли молочной железы
- местно-распространенные опухоли прямой кишки
- опухоли предстательной железы
- тазовые рецидивы
- опухоли поджелудочной железы
- опухоли желудка
- саркомы мягких тканей

Для других типов опухолей, к которым относятся гинекологические опухоли, опухоли легких и пищевода, данные демонстрируют явное уменьшение частоты локальных рецидивов и улучшение имеющихся симптомов.

Пример реализации этого принципа в клинической практике — консервативное лечение рака молочных желез у пациенток в период постменопаузы, которые получают однократную дозу ИОЛТ 21 Гр в течение примерно одной минуты после удаления опухоли. Всего одна минута ИОЭЛТ заменила 5-недельную наружную лучевую терапию, которая раньше была обязательной для пациентов после хирургического вмешательства. Терапия «однократной дозой» — это, несомненно, революционное достижение, однако не менее важной является возможность достижения очень высоких доз лучевой терапии благодаря применению ИОЭЛТ в качестве дополнительного прицельного облучения. Некоторым группам пациентов для контроля заболевания понадобились бы дозы дистанционной лучевой терапии более 60 Гр, при фракционированных дозах по 1,8–2 Гр/день. Однако такие дозы в форме одноразового применения просто невыполнимы: хорошо известно, что дозы выше 45–50 Гр не могут

применяться из-за токсического эффекта на здоровые органы, через которые проходят рентгеновские пучки.

Если интраоперационная электронная лучевая терапия (ИОЭЛТ) применяется совместно с наружной лучевой терапией (НЛТ), а облучение ИОЭЛТ совмещается с фракционированной дозой наружной лучевой терапии 45–50 Гр, фактическая полученная доза повышается до 60–80 Гр при ИОЭЛТ 10 Гр или до 85–100 Гр при сеансе ИОЭЛТ 20 Гр.

Даже если рассматривать только пример лечения опухоли молочной железы, сразу становится очевидным, что всего один сеанс ИОЛТ решает множество проблем: сокращение списков ожидания облучения традиционными ускорителями не только позволяет более эффективно организовать работу, но и существенно влияет на производительность и эффективность отделений лучевой терапии. Для подавляющего большинства центров радиационной онкологии можно рассчитать, что даже если из рабочей нагрузки наружной дистанционной лучевой терапии исключить только случаи опухолей молочной железы, лечение которых проводится посредством ИОЭЛТ, время ожидания для других типов опухолей, требующих применения лучевой терапии, уменьшится до пределов согласно протоколам. Более того, сеанс ИОЛТ в операционной длится до 15 минут и занимает значительно меньше времени сотрудников отделений лучевой терапии по сравнению со стандартными процедурами, согласно которым пациента необходимо разместить в бункере (в случае описанного выше облучения однократной дозой затрачиваемое время будет в 5 раз больше). В операционной пациенты находятся под действием анестезии, и, без сомнения, работать с ними намного легче, чем при использовании традиционного ускорителя.

## 1.2. Особенности глубинного дозного распределения

Излучение различных энергий и источников имеет различия в глубинном распределении дозы от этого излучения в веществе. В интраоперационной лучевой терапии одним из главных факторов, влияющим на выбор энергии и радиуса пучка является особенности его дозного распределения. На рисунке 1.1 представлена сравнительная картина глубинных дозных распределений различных источников.

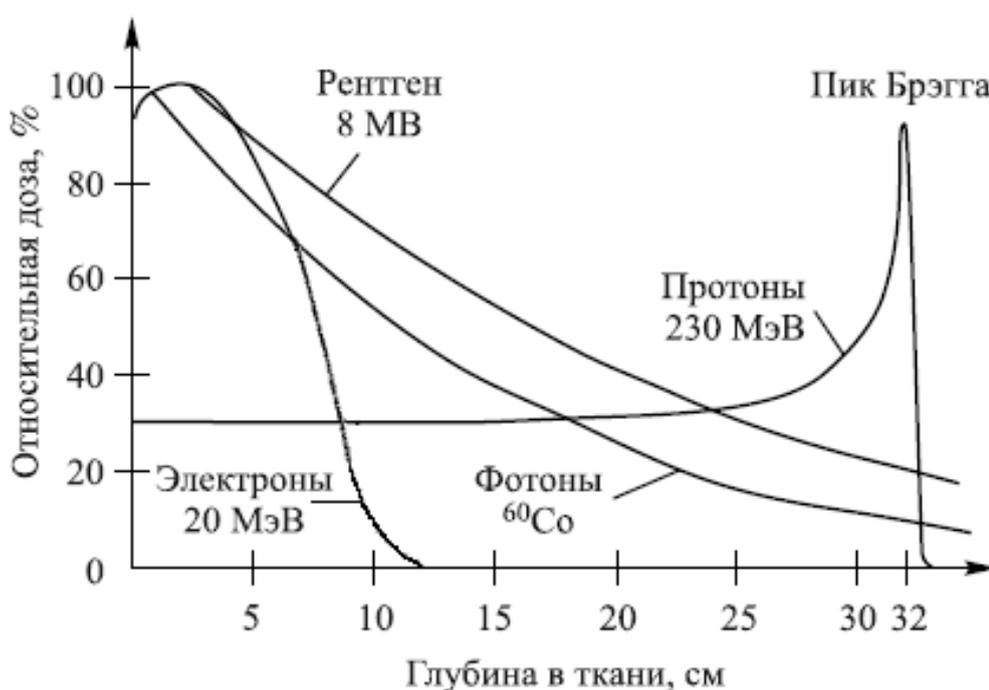


Рисунок 1.1 - Глубинное распределение поглощенной дозы при различных видах источников излучения.

Как видно из приведенного выше графика, дозное распределение электронов имеет максимум поглощенной дозы не у поверхности вещества, а чуть глубже, в отличие от фотонного излучения, которое достигает максимума поглощенной дозы в приповерхностном слое, а далее спадает по экспоненте.

Для применения в ИОЛТ необходимо, чтобы максимум поглощенной дозы приходился на поверхность ткани, чтобы здоровые клетки, находящиеся несколько глубже ложа опухоли, не были подвержены воздействию

излучения, однако, необходимо учесть и размеры опухоли, то есть ее протяженность вглубь. Принято считать, что облучение является эффективным, при поглощении 90-100% максимальной дозы. Если после сеанса облучения не все раковые клетки были подвержены терапии, то шансы развития резистентности или же распространения метастаз значительно увеличиваются [4].

Таким образом, в данной работе предполагалось выявить зависимость положения дозного максимума и терапевтического диапазона от энергии электронов источника. Терапевтический диапазон  $R_t$  ( $R_{90}$ ) определяется как область клинически полезной части глубинного распределения поглощённой дозы и представляет собой глубину от поверхности до уровня 90% относительной поглощённой дозы за дозным максимумом  $D_{max}$ . На рисунке 2.4 представлено положение данных параметров на кривой распределения.

### **1.3. Полимерная пленка Gafchromic EBT3**

Проблема подборов параметров излучения для ИОЭЛТ заключается еще и в том, что методы детектирования поглощенной дозы немного отдалены от реальной ситуации. Принято считать, что корректные результаты можно получить с помощью «золотого стандарта» дозиметрии – ионизационной камеры, однако ввиду ее строения (конечной толщины водозащитного колпачка), полученные данные могут отличаться от реальных. Для того чтобы приблизить полученные результаты глубинного распределения к глубинному распределению в биологической ткани было принято решение о необходимости моделирования процессов, происходящих в живой ткани под воздействием электронного излучения. Ближайшим по составу к биологической ткани веществом оказалась вода. Однако проверить экспериментально правдивость глубинного распределения в воде не удаётся по техническим причинам. Для пораженных участков малых размеров

невозможно вычислить поглощенную дозу из-за отсутствия детекторов таких размеров. Стоит принять во внимание факт того, что поглощенную дозу необходимо измерять в живой ткани на глубине до 4 см, то есть до полного поглощения всех типов первичного и вторичного излучения. Потому, было выдвинуто предположение оценки поглощенной дозы с помощью дозиметрических пленок Gafchromic EBT, экспериментальное применение которых не является затруднительным.

Дозиметрические пленки GAFCHROMIC предназначены для использования с гамма- и рентгеновскими лучами, пучками электронов, протонов, ионов, альфа-частиц и нейтронов, и могут быть использованы для измерения и составления карт источников излучений всех видов, охватывающих широкий диапазон энергий. Активный компонент пленок состоит из кристаллов радиационно-чувствительного мономера субмикронных размеров. Когда пленка подвергается воздействию ионизирующего излучения, запускается реакция полимеризации, в результате чего производится краситель-полимер синего цвета [5]. Количество полимера и глубина изменения цвета пропорциональна поглощенной дозе в активном слое. Дозиметрические пленки GAFCHROMIC по своей сути имеют высокое пространственное разрешение и выходят за рамки возможностей обычных пленок из серебра. Поскольку процесс полимеризации не передается от кристалла к кристаллу, а также отсутствует процесс проявления после воздействия излучения, который мог бы изменить размер или форму частиц, то данные пленки имеют микронное разрешение. Пространственное разрешение ограничено главным образом только применяемым при работе оборудованием [6]. Для проведения измерений экспонированную пленку необходимо оцифровать с помощью любого денситометра, цветного сканера или спектрофотометра.

Химический состав слоёв плёнки:

– Чувствительный слой. Плотность 1,2 г/см<sup>3</sup>, состав (массовые проценты):  
углерод - 59,7%, водород - 9,5%, кислород - 26,1%, азот - 0,2%, литий - 0,9%,  
хлор - 2,3%, калий - 1,3%.

– Поверхностный слой. Плотность 1,3 г/см<sup>3</sup>, состав (массовые проценты):  
углерод - 62,5%, водород - 4,2%, кислород - 33,3%.

## 2. Моделирование дозных распределений

Для правильного подбора энергии при ИОЛТ необходимо корректно учесть глубинное дозное распределение электронов. Сделать это можно с помощью моделирования или экспериментально. Экспериментальное исследование затрудняется некоторыми техническими ограничениями: а именно отсутствием детекторов нужных размеров. В качестве материалов для исследования была выбрана вода и полимерная пленка Gafchromic EBТ-3.

Для реализации поставленных целей и задач производилось моделирование в пакете Монте-Карло моделирования Fluka, позволяющем получить глубинное дозное распределение в любом материале любой плотности.

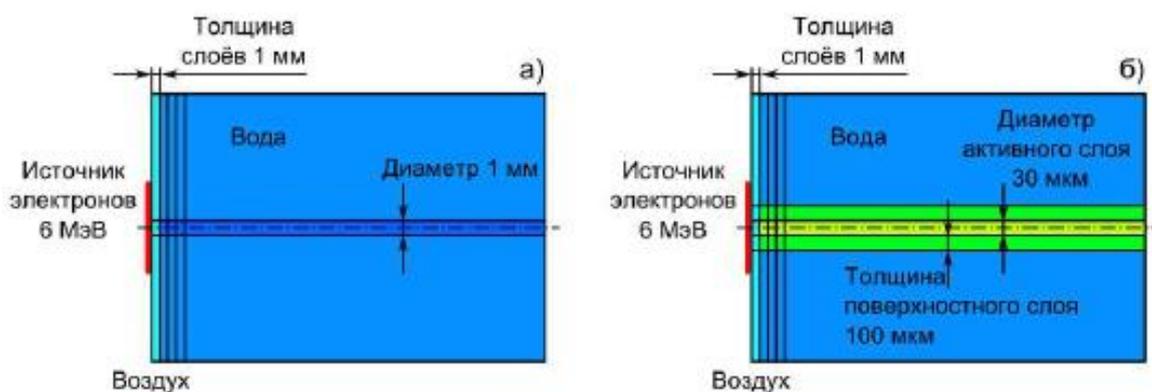


Рисунок 2.1 - Схема моделирования а) в водном фантоме; б) в чистой воде с помощью полимерной плёнки Gafchromic EBТ-3

### 2.1 Моделирование поглощенной дозы в воде

Для серии моделирования глубинных дозных распределений в воде были выбраны следующие параметры пучка и чувствительного слоя:

- Число начальных частиц  $10^7$ ;
- Энергия электронов – 6 МэВ;
- Радиус пучка – 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 мм.

- Радиальные размеры детектирующей среды: 1, 3, 5, 10, 15, 20, 50 мм.

Построение результатов моделирования проводилось на оси пучка на всем протяжении водяного слоя, с шагом 0,5 мм для предоставления наиболее точной картины. То есть по итогам было получено 80 значений величины поглощенной дозы в каждой точке слоя воды. Ввиду большой статистики, погрешность измерений поглощенной дозы в интересующем нас интервале (0 - 30мм) не превышала 1% [7]. Схема моделирования приведена на рисунке 2.1(a).

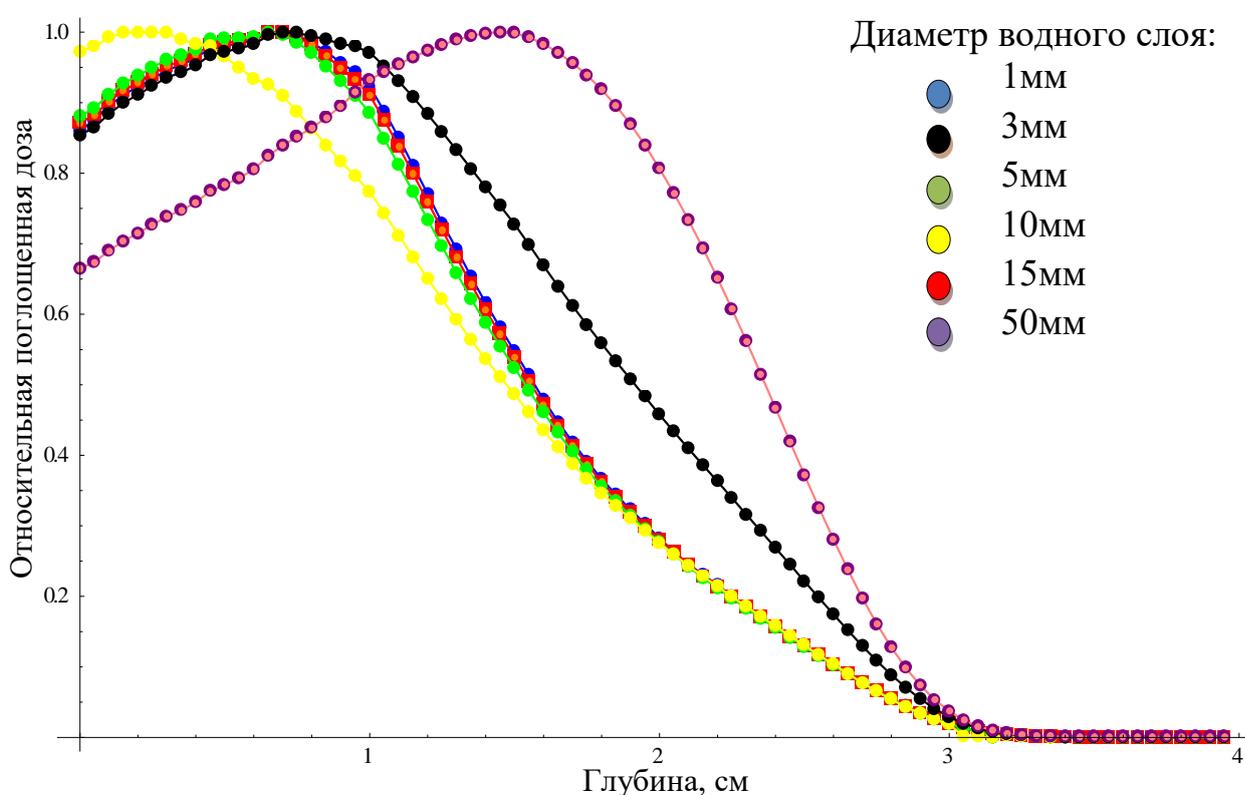


Рисунок 2.2 - Кривые глубинных распределений электронов 6 МэВ в слое воды при диаметре поля 10 мм.

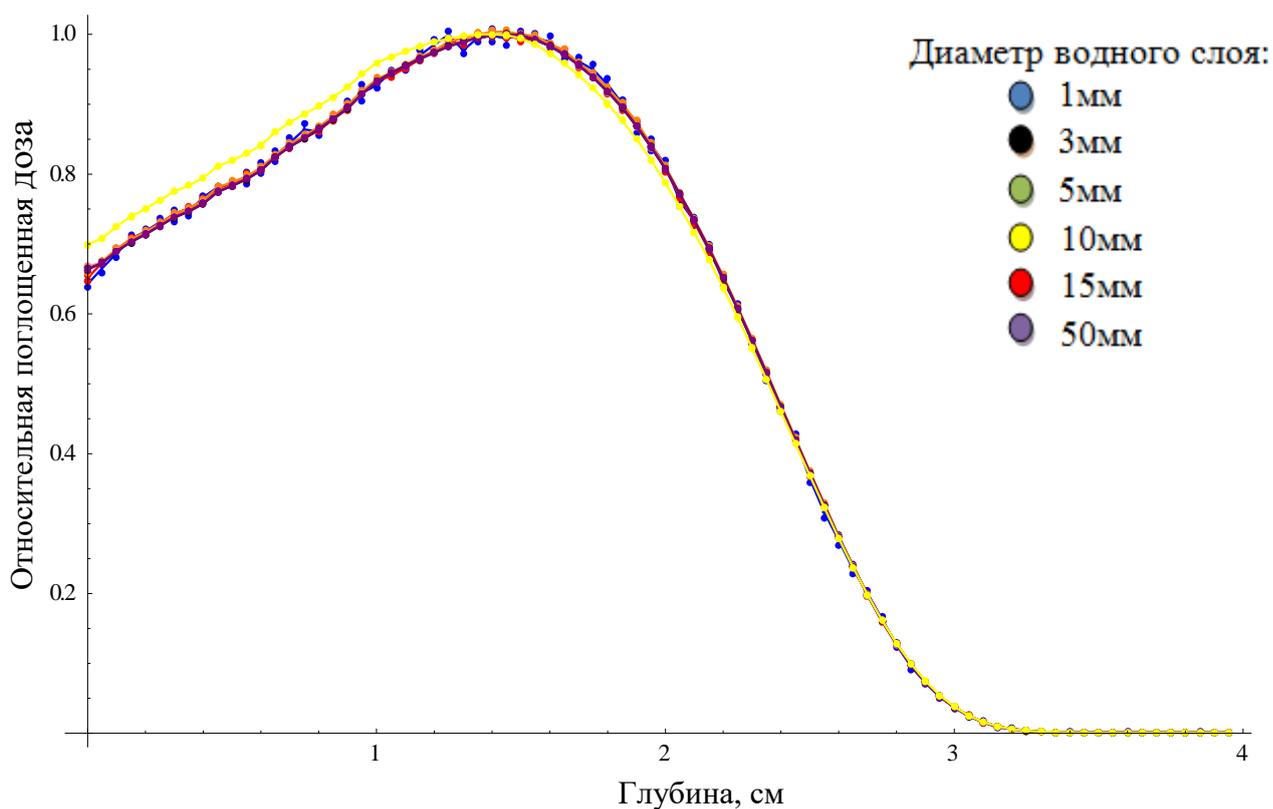


Рис.2.3. Кривые глубинных распределений электронов 6МэВ в слое воды при диаметре поля 60 мм.

По итогам моделирования было получено 56 кривых относительного глубинного распределения поглощенной дозы в воде при разных параметрах моделирования. Примеры данных кривых представлены на рисунках 3 и 4. Для сравнения и наглядного представления результатов моделирования, была построена таблица (Таблица 1), в которой отражены глубина максимальной поглощенной дозы  $D_{max}$ , практический диапазон  $R_p$  и интервал глубин, на которые приходится 90-100% поглощенной дозы, так называемый терапевтический диапазон  $R_t$ , а также  $R_{50}$ .

$R_p$  – практический диапазон, который используется как мера определённой части кривой глубинного распределения поглощённой дозы от электронного пучка. За пределами практического диапазона поглощённая доза возникает только от взаимодействия сопутствующего рентгеновского излучения со средой. Таким образом, на глубинах  $d < R_p$  поглощённая доза в основном обусловлена электронной компонентой, а на глубинах  $d > R_p$  –

фотонной компонентой. Терапевтический диапазон  $R_t$  ( $R_{90}$ ) определяется как область клинически полезной части глубинного распределения поглощённой дозы и представляет собой глубину от поверхности до уровня 90% относительной поглощённой дозы за дозным максимумом  $D_{max}$ .  $R_{50}$  – положение параметра качества электронного пучка.

На рисунке 2.4 представлено положение данных параметров на кривых распределения.

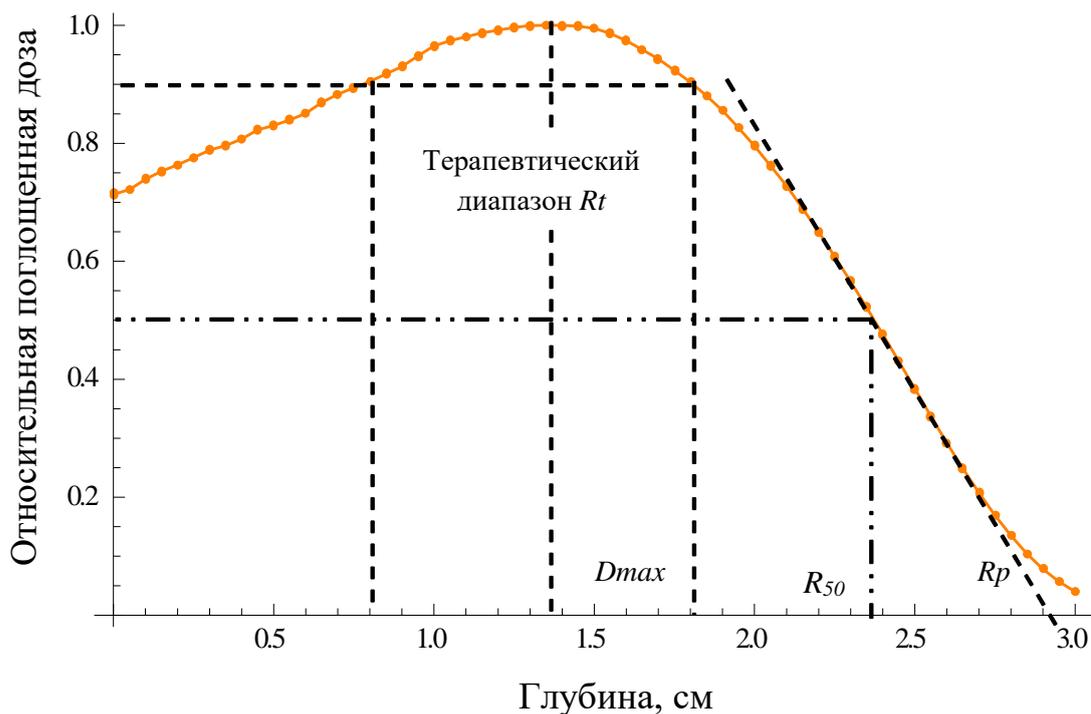


Рисунок 2.4 - Положение практического  $R_p$  и терапевтического  $R_t$  диапазона на кривой глубинного распределения (на примере кривой для пучка диаметром 30 мм).

По результатам моделирования можно заключить, что с увеличением размеров электронного пучка, большой вклад вносят процессы рассеяния частиц от граничных участков чувствительного слоя, а потому и максимум поглощённой дозы имеет сдвиг от приповерхностного слоя. В случае минимального в данной работе размера электронного пучка 10 мм и размера водного слоя 10 мм, максимум поглощённой дозы наблюдается в 1,2 мм от поверхности, что является более чем удовлетворительным результатом для интраоперационной лучевой терапии. В случае равных размеров слоя воды и

поля, такие же результаты не наблюдаются ввиду сказанных выше процессов рассеяния.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики результатов моделирования

	Диаметр поля, мм							
	10	20	30	40	50	60	80	100
Диаметр слоя, мм.	Положение максимума поглощенной дозы, $D_{max}$ мм.							
1	7,1	10,0	12,7	14,6	14,5	12,7	14,9	15,0
3	6,5	10,5	13,9	14,5	14,5	14,3	14,3	14,6
5	6,3	10,6	13,9	14,4	14,5	14,0	14,6	14,1
10	1,2	10,1	13,6	14,7	14,5	14,5	14,3	14,7
15	6,9	10,1	12,7	14,6	14,5	14,4	13,9	14,5
20		6,6	11,6	14,4	14,6	14,4	14,1	14,7
50	14,7	14,9	14,4	13,8	12,7	13,8	14,7	14,4
	Практический диапазон $R_p$ , мм							
1	22,5	29,8	29,3	29,1	29,0	29,1	29,0	29,2
3	21,6	29,7	29,2	29,3	29,1	28,8	29,0	29,3
5	22,1	29,6	29,3	29,2	28,9	29,2	29,2	29,1
10	24,3	29,8	29,1	29,0	29,0	29,0	29,2	29,1
15	29,3	29,6	29,3	29,0	29,1	29,2	29,2	29,0
20		29,6	29,4	29,4	28,9	29,0	29,0	29,0
50	29,2	29,1	29,2	29,3	29,3	29,2	29,1	29,2

Продолжение таблицы 1

	Диаметр поля, мм							
	10	20	30	40	50	60	80	100
Диаметр слоя, мм.	Терапевтический диапазон $R_t$ , мм							
1	1 - 10,4	5,0 - 15,5	7,6 - 18,1	9,3 - 18,6	9,6 - 18,2	9,1 - 18,4	9,8 - 17,9	9,6 - 18,0
3	0,9 - 10,0	4,8 - 15,4	8,0 - 18,03	9,1 - 18,7	9,3 - 18,3	9,3 - 18,5	9,2 - 18,1	9,4 - 18,2
5	0,9 - 9,7	4,7 - 15,0	7,8 - 18,1	9,1 - 18,6	9,3 - 18,4	9,2 - 18,6	9,3 - 18,2	9,3 - 18,4
10	0 - 7	4,2 - 14,4	7,6 - 18,0	9,1 - 18,5	9,2 - 18,6	9,1 - 18,5	9,1 - 18,4	9,2 - 18,4
15	1,6 - 11,6	2,6 - 13,4	6,9 - 17,5	8,7 - 18,6	9,1 - 18,5	9,2 - 18,5	9,1 - 18,4	9,2 - 18,7
20		0 - 12,5	6,1 - 16,9	7,7 - 18,7	9,1 - 18,5	9,121 - 18,5	9,1 - 18,5	9,2 - 18,5
50	9,1 - 18,3	9,0 - 18,3	8,8 - 18,1	7,7 - 18,0	5,6 - 17,3	8,2 - 17,9	9,2 - 18,2	9,1 - 18,7



Продолжение таблицы 1

	Диаметр поля, мм							
	10	20	30	40	50	60	80	100
Диаметр слоя, мм.	$R_{50}$ , мм.							
1	12,97	22,29	23,87	23,98	23,77	23,57	24,16	24,32
3	15,54	22,38	23,78	23,78	23,69	23,63	24,28	24,39
5	15,5	22,28	23,78	23,69	23,66	23,89	24,32	24,28
10	14,76	21,97	23,63	23,88	23,55	23,82	24,17	24,14
15	19,2	21,42	23,41	23,69	23,69	23,98	24,21	24,45
20		21,64	23,33	24,08	23,65	23,86	24,35	24,58
50	23,67	23,64	23,73	23,91	23,47	23,95	24,19	24,27

## 2.2 Моделирование поглощенной дозы в чистой воде, измеренной с помощью полимерной плёнки Gafchromic EBТ-3

Для серии моделирования глубинных дозных распределений в полимерной пленке Gafchromic EBТ3 были выбраны следующие параметры пучка и чувствительного слоя:

- Число начальных частиц  $10^7$ ;
- Энергия электронов – 6 МэВ;
- Радиус пучка – 10, 20, 30, 40, 50, 60 мм.
- Чувствительный слой. Плотность 1,2 г/см<sup>3</sup>, состав (массовые проценты): углерод - 59,7%, водород - 9,5%, кислород - 26,1%, азот - 0,2%, литий - 0,9%, хлор - 2,3%, калий - 1,3%.
- Поверхностный слой. Плотность 1,3 г/см<sup>3</sup>, состав (массовые проценты): углерод - 62,5%, водород - 4,2%, кислород - 33,3%.

Построение результатов моделирования проводилось в чувствительном слое пленки, толщина которого составляет 30 мкм, с шагом 0,5 мм для предоставления наиболее точной картины. То есть по итогам было получено 6 значений величины поглощенной дозы в каждой точке слоя воды. Ввиду большой статистики, погрешность измерений поглощенной дозы в интересующем нас интервале (0 - 30мм) не превышала 1%. Схематичный вид полимерной плёнки представлен на рисунке 2.5.

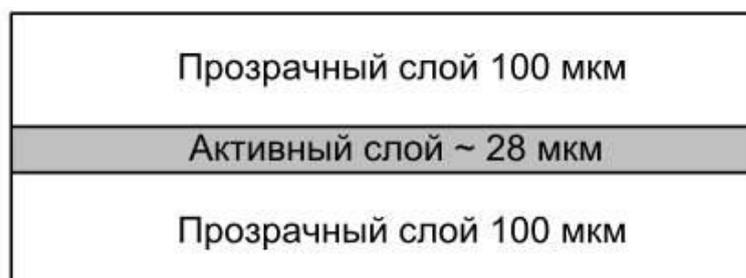


Рисунок 2.5- Gafchromic EBТ-3 вид в разрезе.

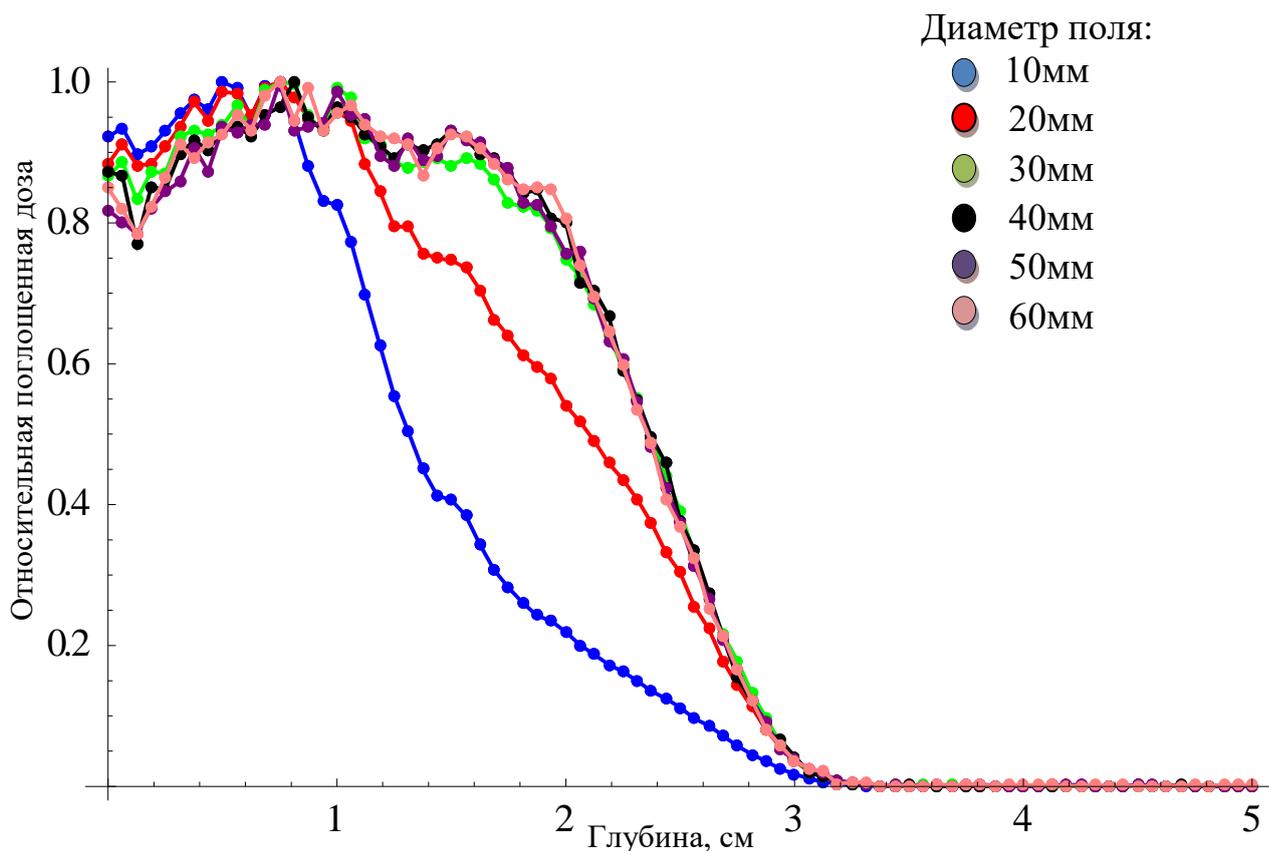


Рисунок 2.6 - Кривые глубинных распределений электронов 6МэВ в полимерной пленке при разных диаметрах полей.

По итогам моделирования было получено 6 кривых относительного глубинного распределения поглощенной дозы в полимерной пленке при разных параметрах моделирования. Примеры данных кривых представлены на рисунке 2.6. Для сравнения и наглядного представления результатов моделирования, была построена таблица (Таблица 2), в которой отражены глубина максимальной поглощенной дозы  $D_{max}$ , практический диапазон  $R_p$  и терапевтический диапазон  $R_t$ , а также  $R_{50}$ .

Таблица 2 - Параметры моделирования поглощенной дозы в воде, измеренной с помощью Gafchromic EBT-3

	Диаметр поля, мм					
	10	20	30	40	50	60
Диаметр слоя, мкм	Положение максимума поглощенной дозы, $D_{max}$ мм					
30	2,2	7,5	8,1	11,3	12,6	12,1
	Практический диапазон $R_p$ , мм					
30	30	30,3	29,6	29,34	29,3	29,2
	Терапевтический диапазон $R_t$ , мм					
30	0-8,2	2,2-11	2,8-12,13	3,1-16,6	4,7-16,7	3,7-16,6
	$R_{50}$ , мм.					
30	13,21	21,07	23,66	23,67	23,61	23,72

По результатам моделирования можно заключить, что с увеличением размеров электронного пучка, максимум поглощенной дозы сдвигается от приповерхностного слоя вглубь. В случае минимального в данной работе размера электронного пучка 10 мм, максимум поглощенной дозы наблюдается в 2,2 мм от поверхности.

### 2.3 Сравнение результатов моделирования

Для сравнения данных, полученных в ходе моделирования, необходимо оценить значения  $R_p$ ,  $R_t$ ,  $D_{max}$  и  $R_{50}$  в условиях одинаковых конфигураций полей.

Для сравнения полученных результатов, кривые глубинного распределения были построены в одной плоскости. На рисунках 2.7, 2.8 и 2.9 приведены некоторые полученные графики, для разных размеров полей.

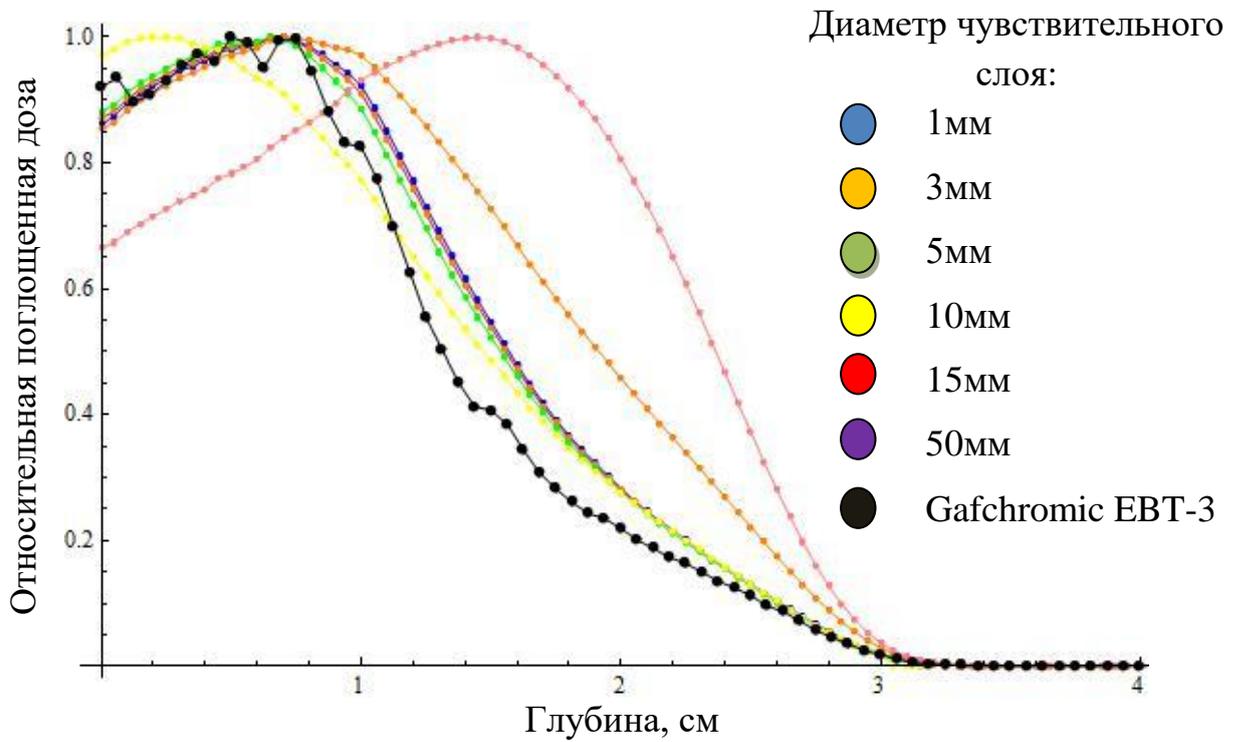


Рисунок 2.7 - Кривые глубинных распределений электронов 6МэВ при диаметре пучка 10 мм.

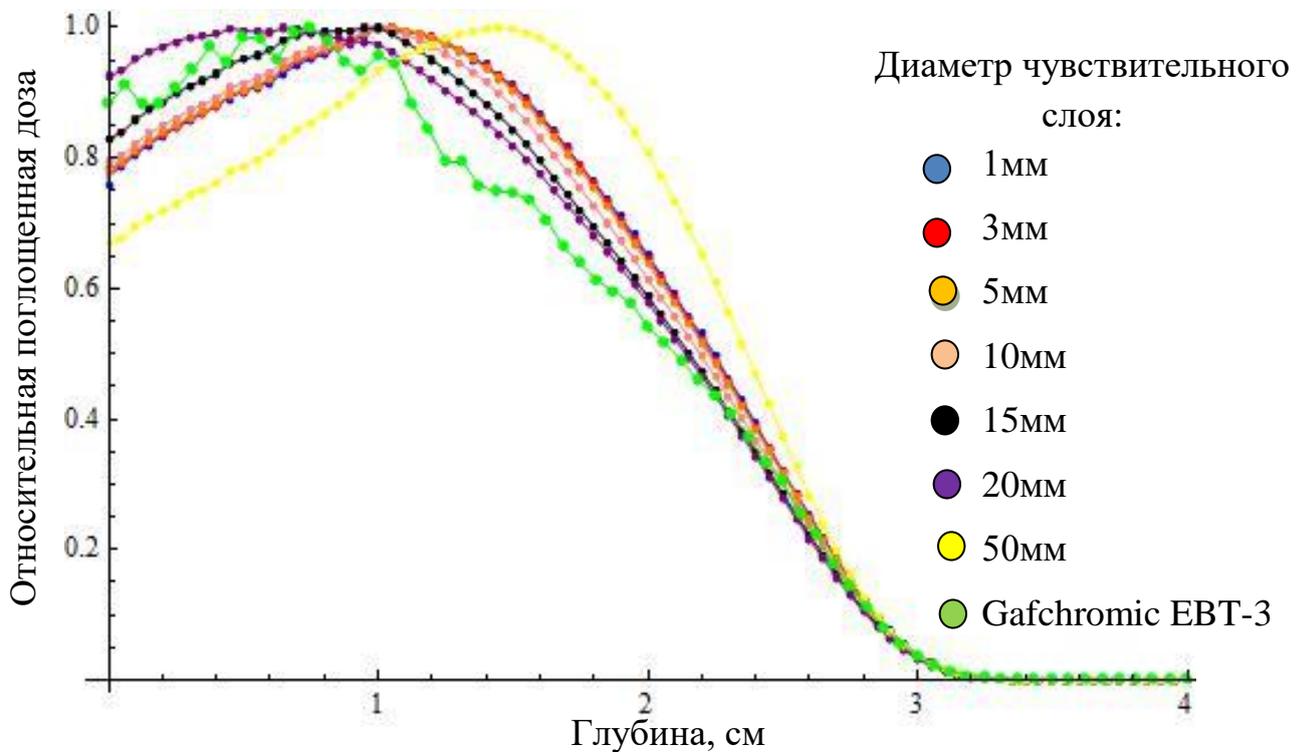


Рисунок 2.8 - Кривые глубинных распределений электронов 6МэВ при диаметре пучка 20 мм.

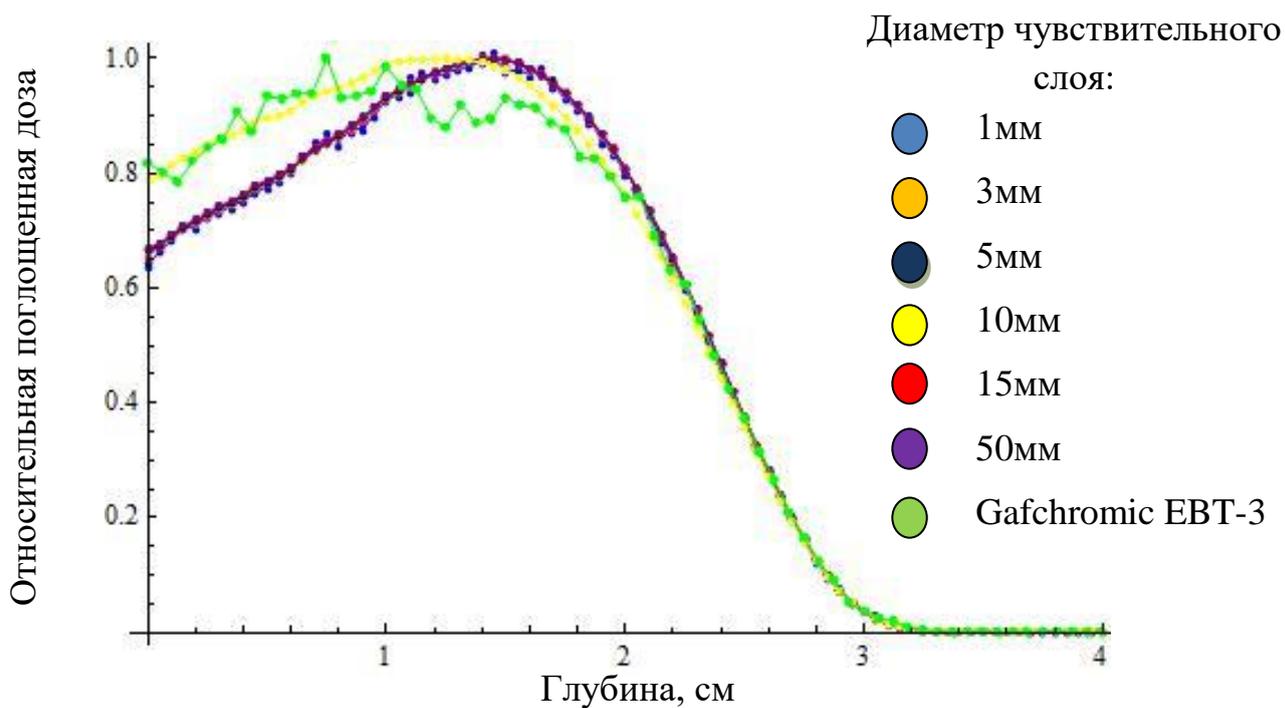


Рисунок 2.9 - Кривые глубинных распределений электронов 6МэВ при диаметре пучка 50 мм.

Как видно из графиков, результаты моделирования, полученные с помощью полимерной пленки Gafchromic EBТ-3 максимально приближены к результатам моделирования поглощенной дозы в воде при равных размерах чувствительного слоя и размера электронного пучка.

### 3. Экспериментальное исследование глубинного дозного распределения

#### 3.1. Обработка экспериментальных данных

Для оценки результатов моделирования поглощенной дозы в чистой воде необходимо сравнить их с результатами, полученными экспериментально с помощью полимерной пленки Gafchromic EBТ-3 на ускорителе Elekta Synergy. Всего было обработано 2 снимка облученных плёнок, для энергий 6Мэв и 9Мэв. Размеры поля в данном эксперименте составили 10\*10мм. На рисунке 3.1 представлены снимки облученных плёнок.



Рисунок 3.1 - Сканированные изображения полимерных плёнок полученных при энергии электронов а) 6МэВ; б)9Мэв.

Работа с изображениями производилась в формате TIFF с помощью пакета WolframMathematica. Каждое изображение представляет собой 48-ми битный массив данных, где отображается значение цвета (в палитре RGB) для каждого пикселя плёнки. Далее индексы  $r$  и  $g$  обозначают красный и зелёный цвета, соответственно.

Первым шагом было отделение определенного цвета из массива данных. Обработка изображений была проведена с помощью красной и зеленой составляющей данного массива. Для того, чтобы перевести размеры плёнки из пикселей в мм использовалось следующее выражение:

$$d = \frac{i * 25,4}{150}, \quad (1)$$

где  $d$  – толщина плёнки в миллиметрах,  $i$  – номер пикселя, 150 – разрешение плёнки в  $dpi$ .

Далее, значение «оттенка» цвета плёнки было переведено в оптическую плотность плёнки за вычетом фона необлученного участка и пьедестала сканера.

$$NetOD = \lg \frac{PV_{before} - PV_{bcgr}}{PV_{after} - PV_{bcgr}} \quad (2)$$

$NetOD$  – значение оптической плотности,  $PV_{before}$  - значение фона,  $PV_{bcgr}$  - пьедестал сканера,  $PV_{after}$  - .

$$PV_{bcgr}^r = 570 \pm 80 \quad (3)$$

$$PV_{bcgr}^g = 630 \pm 81 \quad (4)$$

И с помощью выражений:

$$D^r = (10.3 \pm 0.3)NetOD + (59.2 \pm 2.6)NetOD^{(4.61 \pm 0.16)} \quad (5)$$

$$D^g = (16.5 \pm 0.5)NetOD + (34.2 \pm 0.7)NetOD^{(2.59 \pm 0.09)} \quad (6)$$

усредненные значения оптической плотности были переведены в значение поглощенной дозы, после чего были получены 4 кривых глубинного дозного распределения в двух цветах для каждого снимка. Полученные кривые представлены на рисунках 3.2 и 3.3.

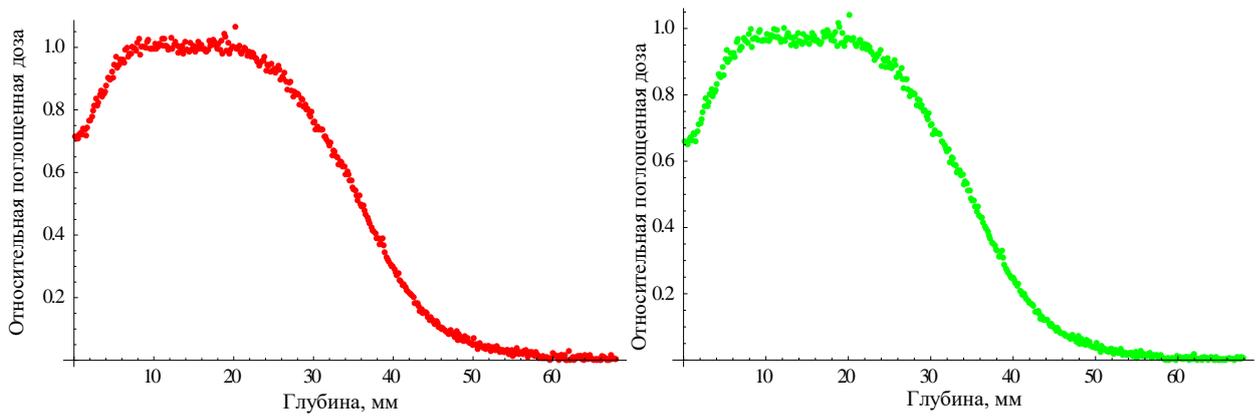


Рисунок 3.2 - Кривая глубинного распределения поглощенной дозы в воде, измеренная с помощью полимерной плёнки при энергии электронов 9МэВ, (а) красный канал; (б) зелёный канал.

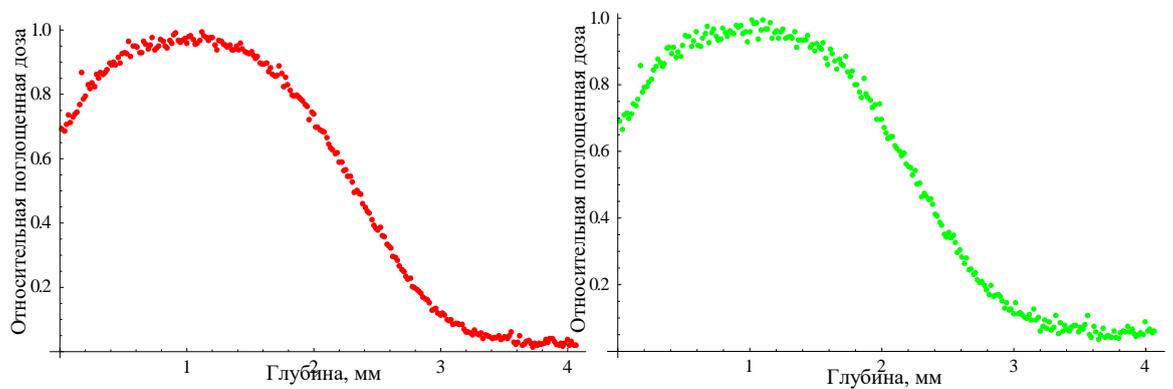


Рисунок 3.3 - Кривая глубинного распределения поглощенной дозы в воде, измеренная с помощью полимерной плёнки при энергии электронов 6МэВ, (а) красный канал; (б) зелёный канал.

Параметры экспериментальных кривых глубинного распределения поглощенной дозы представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты экспериментальных глубинных распределений поглощенной дозы.

	Энергия электронов, МэВ			
	6		9	
	Красный	Зеленый	Красный	Зеленый
Положение максимума <i>D<sub>max</sub></i> , мм.	12,24	12,38	14,49	14,74
Практический диапазон <i>R<sub>p</sub></i> , мм.	30,88	30,45	45,84	44,61
Терапевтический диапазон <i>R<sub>t</sub></i> , мм.	4,325-15,86	4,045-15,95	4,58-26,03	5,156-24,88
<i>R<sub>50</sub></i> , мм.	23,29	22,74	35,22	34,64

Как видно из графиков глубинного распределения и сравнительной таблицы параметров, в случае увеличения энергии электронов, увеличивается ширина терапевтического диапазона, а положение максимума поглощенной дозы сдвигается вглубь от приповерхностного слоя. В свою очередь, цветовой канал, выбранный для оцифровки полученного изображения, практически не влияет на итоговые результаты, вид кривой и значения параметров глубинного распределения.

### 3.2 Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Для сравнения результатов, кривые, полученные экспериментально и с помощью моделирования, были построены на одном графике (рисунок 3.4):

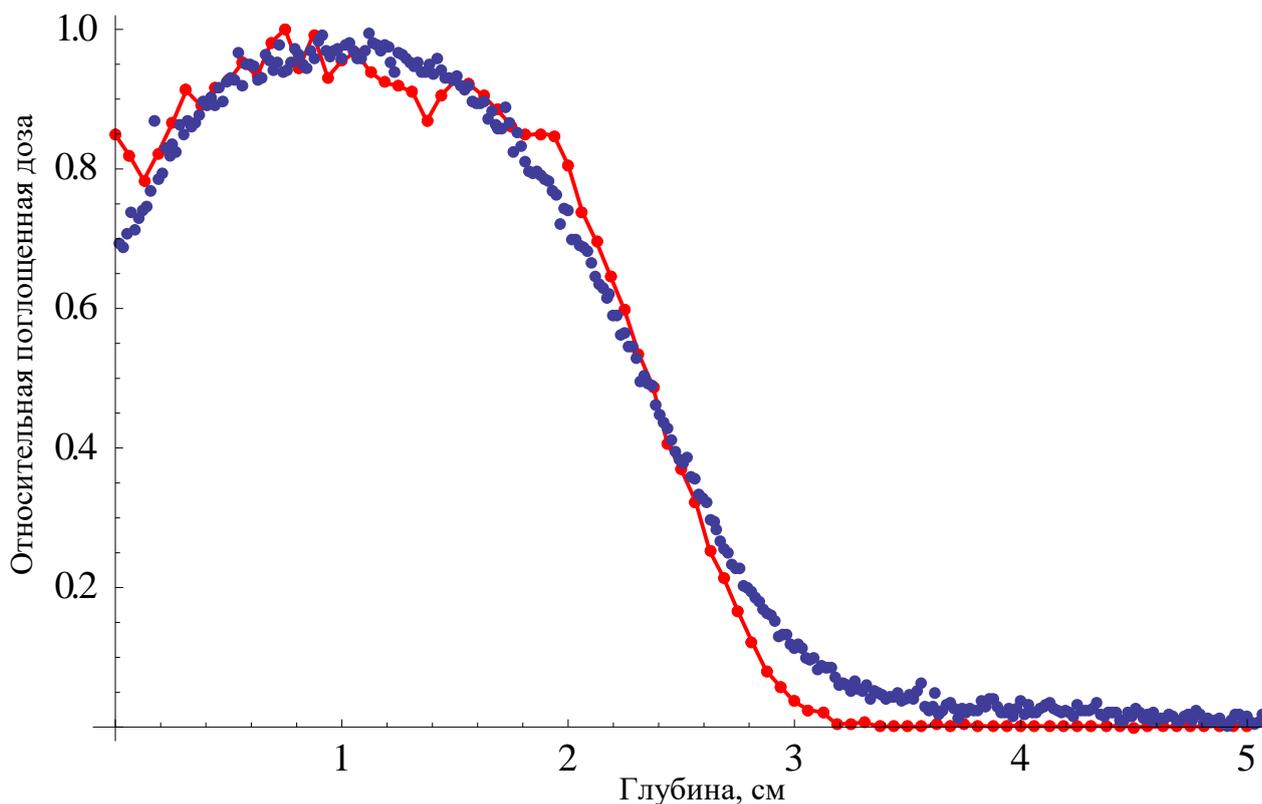


Рисунок 3.4 - Кривые глубинного распределения поглощенной дозы, измеренные экспериментально и с помощью моделирования.

Как видно из рисунка, вид кривых глубинного распределения поглощенной дозы полностью совпадает. Положения максимума поглощенной дозы  $D_{max} = 10,24$  и  $12,1$  мм.; практический диапазон  $R_p$  в обоих случаях составил  $\sim 30$  мм.; границы терапевтического диапазона  $R_t$  [4-16] мм. и [3,7-16,6] мм. для экспериментальной и теоретических кривых соответственно.

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

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

#### **4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

В настоящее время спрос на новые технологии и методы в лечении онкологических заболеваний значительно увеличивается. Крупнейшими рынками производства данных технологий являются компании GE, Siemens, Toshiba, Phillips, что непосредственно связано с государственным интересом в данной области, а также с качеством лечения в клиниках, где данные технологии применяются. Но вышеперечисленные компании являются компаниями мирового уровня, а потому к целевой группе потребителей относятся клиники и центры лечения раковых заболеваний, условия использования которых, несомненно, диктуют люди, подвергшиеся лечению таких заболеваний.

Существуют серьезные научно-исследовательские возможности (сильной стороной для России являются радиологические исследования) и хорошая инфраструктура, подкрепленная тем, что Россия является крупным поставщиком сырья (т.е. радионуклидов) Рассмотрим сегментацию мирового рынка технологического оборудования по области применения данного оборудования и объему соответствующего рыночного сегмента на начало 2017 года. Карта сегментирования рынка по области применения показана на рисунке 4.1.

		Область применения		
		Опухоли молочной железы	Рак легких	Рак желудка
Тип клиник	Государственные больницы	Россия	Россия	
	Частные клиники	Корея/Россия/США	Корея/Россия	США
	Онкологические центры при образовательных учреждениях	Корея/США	Корея	Корея

Рисунок 4.1 - Карта сегментирования рынка биоматериалов по сфере приложения

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Стоит отметить, что коммерческий интерес в России к применению интраоперационной лучевой терапии обусловлен низкой смертностью больных, прошедших курс такого лечения, низким процентом рецидивов, снижением затрат на дополнительный персонал, и отсутствием необходимости дополнительных мер радиационной защиты помещений. Однако, наряду с ИОЭЛТ существуют и другие виды терапии, позволяющие добиться схожих результатов.

Чтобы оценить конкурентоспособность ИОЭЛТ на рынке, построим оценочную карту сравнения рисунок 4.2.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Время процедуры	0,17	5	3	3	0,85	0,51	0,51
2. Экономичность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
3. Безопасность для пациентов	0,13	5	4	5	0,65	0,52	0,65
4. Безопасность для персонала	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
5. Эффективность	0,19	5	4	5	0,95	0,76	0,95
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность	0,06	5	4	5	0,30	0,24	0,30
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	3	4	2	0,15	0,2	0,1
3. Цена	0,11	4	5	3	0,44	0,55	0,33
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,09	5	5	5	0,45	0,45	0,45
Итого	1	41	37	35	4,69	4,03	3,99

К<sub>1</sub> – дистанционная фотонная терапия

К<sub>2</sub> – адронная терапия

Рисунок 4.2 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Таким образом, предлагаемое использование ИОЭЛТ превосходит другие вышерассмотренные варианты по таким пунктам, как безопасность пациентов и персонала, время процедуры и эффективность процедуры.

Преимуществами предлагаемой методики лечения являются:

- Более эффективная процедура;
- Менее продолжительная процедура (длительностью 2-5 минут);
- Минимальное количество сеансов терапии (единоразовое облучение опухоли);
- Меньшая доза поглощаемого пациентом излучения;
- Меньше осложнений от побочных эффектов лучевой терапии.

#### 4.1.3. SWOT-анализ

Для проведения комплексной оценки научно-исследовательского проекта воспользуемся SWOT-анализа и интерактивной матрицей проекта. Полученные результаты представлены в табл.4.1.

Таблица 4.1 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
	<p>С1. Повышение точности определения практического и терапевтического диапазонов</p> <p>С2. Уменьшение времени планирования ИОЛТ ввиду быстрой обработки результатов глубинного распределения</p> <p>С3. Отсутствие необходимости дополнительного оборудования для обработки полученных результатов.</p>	<p>СС1. Отсутствие клинических испытаний, позволяющий применимость данного метода.</p>

Продолжение таблицы 4.1

<p><b>Возможности:</b>          В1. Необходимость появления нового метода дозиметрии глубинных распределений в биологической ткани.          В2. Появление нового и более точного метода планирования позволит применять новое оборудование в лечении онкологических заболеваний.</p>	<p>1. Требования «потребителей» и возможности ИОЭЛТ могут привести к обширным исследованиям и развитию данной метода дозиметрического контроля поглощенной дозы.          2. Малое время обработки результатов распределения поглощенной дозы может послужить обоснованием замены существующих методов лечения на ИОЭЛТ.</p>	<p>1. Появление интереса, а соответственно и финансирования данного метода обусловлены необходимостью новых разработок, что в свою очередь обеспечит и наличие клинических испытаний.</p>
<p><b>Угрозы:</b>          У1. Отсутствие спроса на ИОЭЛТ ввиду удовлетворяющих результатов других методов лечения.</p>	<p>1. Преимущества применения ИОЭЛТ могут ускорить процесс вывода из оборота старого, но работоспособного оборудования.          2. Единокрайное применения данного вида терапии может быть единственным приемлемым выбором для краевых или областных учреждений, принимающих пациентов, место жительства которых не позволяет им проходить длительные курсы терапии.</p>	<p>1. Задержка испытаний на приведет к «заморозке» развития данного метода ИОЭЛТ на неопределенный срок.</p>

## **4.2 Планирование научно-исследовательских работ**

### **4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования**

Научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки разбиваются на этапы в соответствии с ГОСТ 15.101-98, (для НИР) ГОСТ Р 15.201-2000 (для ОКР). В зависимости от характера и сложности НИОКР ГОСТ допускает разделение этапов на отдельные виды работ.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться от 3 до 15 человек. В рамках данной работы была сформирована рабочая группа, в состав которой вошли:

- руководитель;
- студент.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ по выполнению НИР, проведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок этапов и работ при выполнении ВКР приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ Работ	Содержание работы	Исполнитель
Разработка технического задания на НИР	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Выбор направления исследования	Руководитель
	4	Разработка общей методики проведения исследований	Руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические исследования	6	Изучение документации, поиск литературы	Студент
	7	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	Студент
Проведение расчетов	8	Получение необходимых данных	Студент
	9	Создание графических зависимостей	Студент
	10	Анализ и описание результатов	Студент
Оформление отчета по НИР	11	Проверка полученных результатов	Руководитель
	12	Составление пояснительной записки	Студент

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Следующим этапом является определение трудоемкости выполнения НИОКР. Трудоемкость выполнения НИОКР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости работ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{ожі}$  - ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, (чел.-дн.);  $t_{\min i}$  - минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), (чел.-дн.);  $t_{\max i}$  - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), (чел.-дн.). Вычисление трудоемкости проводится следующим образом с использованием вышеприведенной формулы:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1.8 \quad (4.2)$$

Дальнейшие расчеты трудоемкости проводятся подобным образом с использованием данных из таблицы.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{q_i}, \quad (4.3)$$

где  $T_{pi}$  - продолжительность одной работы, (раб. дн.);  $t_{ожi}$  - ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, (чел.-дн.);  $Ч_i$  - численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, (чел.). В ходе данной работы количество человек, выполнявших каждую из работ на каждом из этапов, равняется одному.

Вычисление продолжительности каждой работы проводится следующим образом с использованием вышеприведенной формулы:

$$T_{pi} = \frac{1,8}{1}, \quad (4.4)$$

Дальнейшие расчеты продолжительности каждой работы проводятся подобным образом с использованием данных из таблицы 4.3.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k, \quad (4.5)$$

где  $T_{ki}$  - продолжительность выполнения одной работы, (кален. дн.);  $T_{pi}$  - продолжительность одной работы, (раб. дн.);  $k$  - коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Расчет коэффициента календарности производится по следующей формуле:

$$k = \frac{T_{кз}}{T_{кз} - T_{вд} - T_{нд}} = 1,22, \quad (4.6)$$

где  $T_{кз}$  - количество календарных дней в году ( $T_{кз} = 365$  дн.);  $T_{вд}$  - количество выходных дней в году ( $T_{вд} = 52$ );  $T_{нд}$  - количество праздничных дней в году, ( $T_{нд} = 14$ ). Расчетную величина продолжительности работ  $T_{ki}$  была округлена до целых чисел. Вычисление длительности этапов в календарных днях проводится следующим образом с использованием вышеприведенной формулы:

$$T_{ki} = 1,8 \cdot \frac{365}{365 - (52 + 14)} = 1,22 \quad (4.7)$$

Расчетные данные сведены в таблице, на основании которой был построен календарный план-график.

Таблица 4.3 – Временные показатели проведения научного исследования

$i$	Исполнитель	$t_{min i}$	$t_{max i}$	$t_{ож i}$	$\Psi_i$	$T_{p i}$ , раб.дн	$T_k$ , кал.дн.
1	Руководитель	1	3	1,8	1	1,8	2
2	Студент	2	5	3,2	1	3,2	4
3	Руководитель	1	4	2,2	1	2,2	3
4	Руководитель	2	6	3,6	1	3,6	4
5	Руководитель	1	3	1,8	1	2	2
6	Студент	3	5	2,6	1	2,6	3
7	Студент	1	3	1,8	1	1,8	2
8	Студент	15	20	17	1	17	21
9	Студент	8	12	9,6	1	9,6	12
10	Студент	5	9	6,6	1	6,6	8
11	Руководитель	2	3	2,4	1	2,4	3
12	Студент	2	3	2,4	1	2,4	3
Итого		43	76	56,2	-	12/43,2	67

#### 4.2.3 Календарный план-график в виде диаграммы Ганта

На основании полученных данных был построен план-график в виде диаграммы Ганта. График строится с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных

за ту или иную работу. Календарный план-график выполнения данной дипломной работы представлен ниже.

Таблица 4.4 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ									
				Май									
				1-4	5-7	8-11	12-15	16-19	20-23	24-27	27-30		
1	Составление и утверждение технического задания	Р	2										
2	Подбор и изучение материалов по теме	С	4										
3	Выбор направления исследований	Р	3										
4	Разработка общей методики проведения исследований	Р	4										
5	Календарное планирование работ по теме	Р	2										
6	Изучение документации, поиск литературы	С	3										
7	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	С	2										



- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

### 4.3.1 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.9)$$

,где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата,  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.10)$$

, где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника,  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица .),  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (4.11)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб. (в качестве месячного оклада руководителя выступает 22300 руб. для доцента, кандидата наук);

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

- при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	52	52
-праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
-отпуск	48	48
-невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ТС}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (4.12)$$

где  $Z_{\text{ТС}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб. (для доцента  $Z_{\text{ТС}}$  составляет 23264,86 руб.);

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З <sub>тс</sub> , руб.	$k_p$	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб.	T <sub>р</sub> , раб. дн.	З <sub>осн</sub> , руб.
Руководитель	23264,86	1,3	30244,318	1253,15	12	15037,8
Студент	9893	1,3	12860,9	532,88	43,2	23020,416
Итого						38058,216

#### 4.3.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Дипломная работа выполнялась с 01.05.2016 по 01.06.2016 С 01.01.2010 страховые взносы осуществляются в государственные внебюджетные фонды. На 2016 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году водится пониженная ставка – 27,1 [13].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.13)$$

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

Таким образом, выплаты в страховые фонды составят:

$$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot 23020,416 = 6238,53 \text{ руб.}$$

#### 4.3.3 Накладные расходы

Ввиду способа выполнения данной работы, материальный затраты отсутствуют. Однако следует рассчитать затраты на электроэнергию, потребляемую ПК, а также амортизацию сервера, производящего вычисления.

Мощность рабочей станции: 0,5 кВт. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 5,8 \cdot 0,5 \cdot 480 = 2784, \quad (4.8)$$

где  $C_{эл}$  — тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);  $P$  — мощность оборудования, кВт;  $F_{об}$  — время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 2784 рубль.

Таблица 4.7 — Затраты на сырье и материалы

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Электроэнергия	кВт·ч	480	5,8	2784
Итого				2784

#### 4.4.4. Амортизация оборудования

С учетом использования оборудования в течении 12 месяцев и его начальной стоимости (на момент начала использования) около 200 тысяч руб., а сроком полезного использования 10 лет амортизацию сервера будем рассчитывать следующим образом:

$$\text{Ежегодная сумма амортизации} = \frac{200000}{10} = 20000 \text{ тыс. руб.}$$

#### 4.3.4 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями.

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками.

Так как при проведении научно-технических исследований все подготовительно-отладочные работы, технологические операции и расчеты были осуществлены на базе кафедры № 23 ФТИ ТПУ с имеющимся оборудованием и расходными материалами только научным руководителем и дипломником без привлечения сторонних организаций, то в данном случае можно говорить, что контрагентные расходы отсутствуют.

#### **4.3.5 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ**

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Так как при проведении научно-технических исследований все подготовительно-отладочные работы, технологические операции и расчеты были осуществлены на базе кафедры ФТИ ТПУ с имеющимся оборудованием и расходными материалами, то в данном случае можно говорить, что затраты на специальное оборудование для научных работ отсутствуют.

#### **4.3.6 Расчет затрат на научные и производственные командировки**

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных тарифов.

Так как при проведении НТИ не было научных и производственных командировок, то в данном случае можно говорить, что затраты на научные и

производственные командировки отсутствуют.

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

На основании выше сказанного составим бюджет затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения, приведен в таблица 4.8.

Таблица 4.8. – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	38058,216	Пункт 4.3.1
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	0	Пункт 4.3.2
3. Отчисления во внебюджетные фонды	6238,53	Пункт 4.3.2
4. Накладные расходы	2784	Пункт 4.3.3
5. Амортизация оборудования	20000	Пункт 4.3.4
6. Затраты на специальное оборудование для научных работ	0	Пункт 4.3.5
7. Затраты на научные и производственные командировки	0	Пункт 4.3.6
8. Бюджет затрат НИИ	67080,75	Сумма ст. 1–8

Для выполнения данных исследований были задействованы два исполнителя: научный исполнитель и дипломный руководитель. Из вышеизложенной калькуляции видно, что для реализации данного проекта необходимо 36 календарных дней, суммарный бюджет научно-технического исследования составил 67080,75 рублей.

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр.}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.15)$$

где  $I_{\text{финр.}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

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

Так как разработка имеет одно исполнение, то:

$$I_{\text{финр.}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = 1. \quad (4.16)$$

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.17)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;  $n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы 4.9.

Таблица 4.9 – Оценка характеристик исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Производительность	0,2	4	5	5
2. Энергосбережение	0,4	5	4	5
3. Надежность	0,3	5	5	5
4. Материалоемкость	0,1	4	4	3
ИТОГО	1	18	18	18

$$I_{p-исп1} = 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,1 = 4,8;$$

$$I_{p-исп2} = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,1 = 4,5;$$

$$I_{p-исп3} = 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,1 = 4,8;$$

Таблица 4.10 – Оценка вариантов исполнения

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,9	0,8
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,8	4,5	4,8
3	Интегральный показатель эффективности	4,8	4,05	3,84
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,2	1	0,95

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что научно-техническое исследование будет ресурсоэффективно при первом варианте исполнения проекта, т.е. при удовлетворительной производительности и высокой энергоэффективности проекта.

## 5. Социальная ответственность

Одним из возможных вариантов снижения травматизма на производстве, а также профессиональной заболеваемости является внедрение комплекса мер охраны труда. Законодательство Российской Федерации об охране труда ссылается на Конституцию Российской Федерации и Трудовой кодекс Российской Федерации.

Работодатель берет на себя обязанности по обеспечению *безопасных условий и охраны труда* в организации. Согласно Федеральному закону от 17 июля 1999 г. №181-ФЗ "Об основах охраны труда в Российской Федерации" (с изменениями от 20 мая 2002 г., 10 января 2003 г., 9 мая, 26 декабря 2005 г.) остановимся на некоторых понятиях.

Охрана труда - это система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека во время труда.

Условия труда – совокупность факторов производственной среды и трудового процесса, оказывающих влияние на работоспособность и здоровье работника.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме и смерти.

Безопасные условия труда – такие условия труда, при которых воздействие вредных или опасных производственных факторов на работников исключено или уровни их воздействия не превышают установленные нормы.

Рабочее место – место, в которое необходимо прибыть работнику для выполнения его работы.

Рабочие, служащие, инженерно – технические работники и руководящий состав обязаны следовать правилам по охране труда и техники безопасности [8].

Полностью безопасных и безвредных производств не существует. Задача охраны труда — свести к минимуму вероятность поражения или заболевания работающего с одновременным обеспечением комфорта при максимальной производительности труда. Реальные производственные условия характеризуются, как правило, наличием некоторых опасных и вредных производственных факторов.

## 5.1 Анализ опасных и вредных факторов

Дипломная работа была выполнена на кафедре ПФ ФТИ. Работа выполнялась с использованием ПЭВМ.

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

В таблице 5.1 представлены основные виды работ, которые могут привести к воздействию опасных и вредных факторов.

Таблица 5.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Расчёт данных на ПЭВМ.	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВ Ч и т.д.)	—	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»

На инженера, который работает на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические опасные и вредные производственные факторы делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

## **5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ**

### **5.2.1. Организационные мероприятия**

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

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

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

## 5.2.2. Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 5.1.

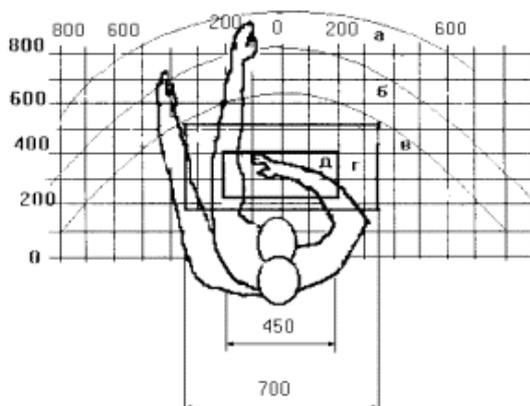


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования:

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

Организация рабочего места показана на рис. 5.2.

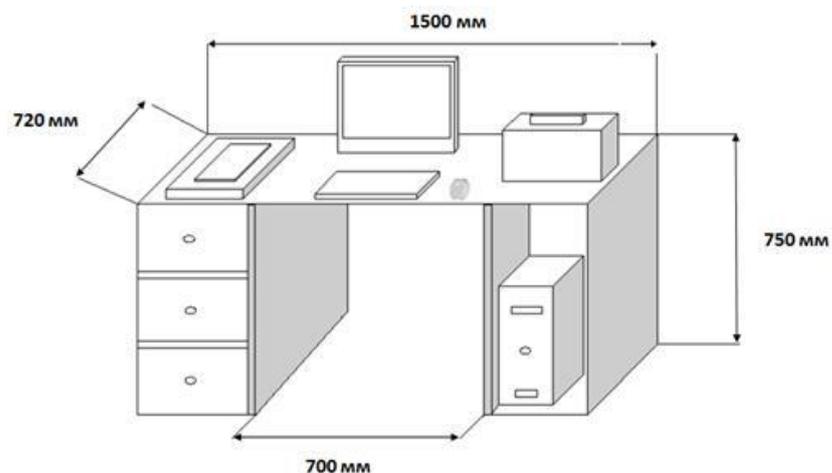


Рисунок 5.2 – Схема организации рабочего места

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

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

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

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

должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

### 5.2.3. Условия безопасной работы

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

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата и приведены в таблицах 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40-60	0,1

Таблица 5.3 – Допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С		Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже допустимого	Диапазон выше допустимого		Для диапазона ниже допустим	Для диапазона выше допустим
Холодный	20,0-21,9	24,1-25,0	15-75	0,1	0,1
Тёплый	21,0-22,9	25,1-28,0	15-75	0,1	0,2

Температура – степень нагретости воздуха в рабочем помещении. По закону при восьмичасовом рабочем дне температура воздуха в офисном помещении должна составлять 23-25°C в теплое время года и 22-24 °С в холодное (при относительной влажности 40-60%). Отклонение от нормы разрешено лишь на 1-2 °С. Допустимое колебание температуры во время рабочего дня – не больше 3-4 °С [9].

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. При объеме помещения до 20 м<sup>3</sup> в него должно подаваться, не менее 30 м<sup>3</sup>/ч наружного воздуха на одного человека. В случае объема помещения более 40 м<sup>3</sup> на одного человека допускается естественная циркуляция, но с учетом отсутствия выделения вредных веществ.

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что подача приточного воздуха идет в помещения без предварительной очистки и подогрева.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

В работе [9] приведены следующие значения уровня шума в помещениях офисов, проектных и научно-исследовательских организаций:

- допустимый уровень – 45 дБ;
- максимальный уровень – 60 дБ;
- оптимальный уровень – 50 дБ.

При выполнении работы на ЭВМ уровень шума в рабочем помещении не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [9] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

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

Плотность магнитного потока должна быть не более:

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [9] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

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

В производственном помещении применяется общее равномерное освещение с помощью люминесцентных ламп.

Согласно требованиям [10] освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

### 5.3 Электробезопасность

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

Влияние электрического тока на организм человека носит разносторонний характер, и может привести как к легкому, так и к тяжелому исходу.

Проходя через организм человека, электрический ток оказывает термическое и биологическое действия:

- нагрев тканей вплоть до ожогов;
- разложение крови и плазмы – нарушение физико - химического состава;
- возбуждение тканей организма (судороги).

Действие тока может привести к электрической травме.

Таким образом, действие тока на организм человека может быть местным и общим. Общее (рефлекторное) поражение – электрический удар, представляет для человека наибольшую опасность: нарушается работа центральной нервной и сердечно - сосудистой систем, что приводит к фибрилляции и параличу сердца, а также к остановке дыхания.

Степень опасности и исход поражения электрическим током зависят от ряда причин. Основными из них являются: величина тока, проходящего через организм; путь прохождения тока; продолжительность действия тока; частота тока и сопротивление человека в момент соприкосновения с токоведущими частями, которые, в свою очередь, зависят от состояния окружающей среды (температура, влажность воздуха и т.д.).

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

Помещение, в котором проводится работа, относится к группе помещений без повышенной опасности: сухое (влажность воздуха не превышает 75%), не жаркое (температура не превышает 28°C), с токонепроводящими полами, без токопроводящей пыли и химически активной среды. Все провода, подводящие напряжение к электрооборудованию, электроизолированы и находятся в заземленной металлической оплетке. Рубильник распределительного щитка имеет пластмассовый кожух. Также имеются отключающие автоматы. Выполнен контур защитного заземления из стальной полосы сечением 30 мм<sup>2</sup> по периметру помещения. Все электрические приборы в лаборатории заземлены.

Согласно [11] заземляющее устройство должно иметь в любое время года сопротивление не более 0,4 Ом.

Для предотвращения появления статического электричества и защиты от его влияния в помещении необходимо использовать нейтрализаторы и увлажнители, а полы должны иметь антистатическое покрытие. Конструкция пола в помещении обеспечивает сток и отвод статического электричества. Покрытие пола выполнено из гладких, прочных, обладающих антистатическими свойствами материалов.

#### **5.4. Пожарная и взрывная безопасность**

Согласно [12], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, так как содержит твердые сгорающие вещества.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;

- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

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

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

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

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

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

- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

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 [13] таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда, повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара.

Согласно требованиям пожарной безопасности, на этаже находится 2 огнетушителя ОП-3 – огнетушители переносные порошковые, лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## Заключение

По итогам работы было проведено моделирование поглощенной дозы в водном фантоме при различных параметрах моделирования. Также было проведено моделирование в воде, с использованием полимерной плёнки Gafchromic EBT-3. Результаты моделирования и обработки экспериментальных данных сравнивались на основании значений параметров глубинного распределения дозы.

После сравнительного анализа относительных глубинных распределений доз в чистой воде, можно сделать следующие выводы. Максимум приповерхностной дозы наблюдается в случае полей малого поперечного размера. В случае, если размеры поля и водного слоя более 10 мм, или же различаются, то максимум поглощенной дозы значительно сдвигается от приповерхностного слоя (по данным таблицы 1 от 15 мм), ввиду процессов рассеяния от граничных слоев. То есть для качественного применения ИОЛТ необходимо использовать пучки частиц малых размеров, облучая пораженную область «сканированием». В этом случае, согласно результатам моделирования, терапевтический диапазон начинается уже с поверхности фантома, что позволяет улучшить контроль над опухолью. Также снижается количество поражаемых здоровых клеток из-за меньшего значения параметра  $R_{50}$ . Ширина терапевтического диапазона варьируется от 7 до 12 мм, но в случае облучения узким пучком, нижняя граница данного диапазона находится на поверхности ткани, в случае более широкого пучка – сдвигается вглубь от поверхности до 10мм.

При сравнении результатов моделирования можно утверждать, что кривые глубинного распределения, полученные с помощью полимерной плёнки хорошо согласуются с кривыми поглощенной дозы в чистой воде. Экспериментальные исследования также указывают на достоверность результатов моделирования и возможность применения дозиметрических плёнок семейства Gafchromic в качестве метода дозиметрии в ИОЭЛТ.



## Список использованных источников

1. Intraoperative Irradiation: Techniques and Results / Leonard L. Gunderson, Christopher G. Willet, Felipe A. Calvo, Loui. — Springer Science & Business Media, 2011. — 530 pp
2. Онкология: учебник для вузов / Вельшер Л.З., Матякин Е.Г., Дудицкая Т.К., Поляков Б.И. - 2009. - 512 с.
3. Труфанов, Г.Е. Лучевая терапия: учебник. - Т. 2. / Труфанов Г.Е., Асатурян М.А., 2010. - 192 с.: ил.
4. Лисин В.А. ФИЗИЧЕСКИЕ И РАДИОБИЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ. УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ. ТПУ. ТОМСК, 2006, с. 169.
5. Сарычева С.С. Радиационная защита пациентов при проведении интервенционных рентгенологических исследований: диссертация ... кандидата биологических наук: Санкт-Петербург, 2013. - 209 с.
6. Сухих Е.С. Клиническая дозиметрия фотонных и электронных пучков медицинских ускорителей на основе полимерных плёнок Gafchromic EBТ-3: дис. канд. физ.-мат. наук.: Томский политехнический университет, Томск, 2015.
7. Андреев, В.В. Метод Монте-Карло в физике элементарных частиц: Курс лекций / В.В. Андреев: Гомельский государственный университет, 2005 г. — 74 с.
8. ГОСТ 12.0.002-80. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
9. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ Опасные и вредные факторы. Классификация. – М.: ИПК: Изд-во стандартов, 1997 г.
10. Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение" (утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78)

11. ГОСТ 12.1.030-81, Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
12. НПБ 105-95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. 31 окт. 1995 г.
13. ГОСТ 12.4.009-83, Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.