

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МЕДИЦИНСКОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

УДК 621.384.665:615.47:53:519.245

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5А	Богунова Алина Сергеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯШТ	Беспалов В.И.	к. ф.-м. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Подопригора И.В.	к. э. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Общекультурные компетенции	
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.
Р5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р6	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.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р8	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).
Р9	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.
Р10	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.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
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.

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ 23.04.2019 Бычков П.Н.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ **на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0A5A	Богунновой Алине Сергеевне

Тема работы:

Моделирование методом Монте-Карло характеристик электронного пучка медицинского линейного ускорителя..

Утверждена приказом директора (дата, номер) 1862/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1) Программа PCLab «Компьютерная лаборатория»; 2) Статья «Influence of initial electron beam characteristics on Monte Carlo calculated absorbed dose distributions for linear accelerator electron beams».
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1) Обзор литературы по теме и выбор геометрии для моделирования; 2) Составление файлов данных для моделирования; 3) Расчеты характеристик электронного пучка, при его прохождении геометрии формирования; 4) Подбор начальной энергии, для согласия с экспериментальными данными; 5) Метод уменьшения времени расчета; 6) Анализ результатов и выводы; 7) Финансовый менеджмент; 8) Социальная ответственность; 9) Заключение.

Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Подопригора И.В.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:	
Введение	
Обзор литературы	
Расчет характеристик электронного пучка медицинского линейного ускорителя	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Беспалов В.И.	к. ф.-м. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5A	Богунова Алина Сергеевна		

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла
 Период выполнения весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения бакалаврской работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
14.03.19	Составление и утверждение технического задания	
15.03.19	Подбор и изучение материалов по теме	
21.04.19	Проведение моделирования	
10.05.19	Получение данных мониторинга	
13.06.19	Подготовка к защите ВКР	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Беспалов В.И.	к. ф.-м. н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A5A	Богуновой Алине Сергеевне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Радиационная безопасность человека и окружающей среды

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	– Материальные затраты – 445; – Затраты на специальное оборудование – 25750; – Заработная плата – 7754; – Отчисления во внебюджетные фонды – 2171; – Накладные расходы – 908,6; – Бюджет затрат НИ – 37028,6.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Тариф на электроэнергию 2,45 р. за 1 кВт*ч
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	– Районный коэффициент – 30%; – Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 28%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ альтернативных способов проведения НИ
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	– Иерархическая структура работ; – SWOT – анализ; – определение трудоемкости выполнения работ.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Бюджет научно – технического исследования: – расчет материальных затрат; – расчет затрат на специальное оборудование; – расчет основной и дополнительной заработной платы исполнителей темы; – отчисления на социальные нужды; – накладные расходы; – формирование бюджета затрат.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка;
2. Оценка конкурентноспособности технических решений;
3. Матрица SWOT
4. График проведения и бюджет НИ;
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Подопригора И.В.	К. Э. Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5A	Богунова Алина Сергеевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А5А	Богуновой Алине Сергеевне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Радиационная безопасность человека и окружающей среды

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме:	– требования к охране труда по работе с ПЭВМ; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	23.04.2019
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		23.04.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5А	Богунова Алина Сергеевна		23.04.2019

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 74 страницы, 25 рисунок, 19 таблиц, 19 источников.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, медицинский линейный ускоритель, типовая схема формирования электронного пучка.

Объектом исследования являются характеристики электронного пучка.

Цель работы – рассчитать методом Монте-Карло характеристики электронного пучка медицинского линейного ускорителя с учетом типовой схемы формирования пучка.

В ходе исследования было выполнено моделирование методом Монте-Карло характеристик электронного пучка с учетом его системы формирования. Были рассчитаны спектральные, глубинные и поверхностные распределения электронного пучка. Была рассчитана начальная энергия линейного ускорителя ONCOR, при которой было достигнуто соответствия между рассчитанными и экспериментальными данными. С целью уменьшения времени расчета был использован плоский источник. Произведена оценка уменьшения времени расчета.

Область применения: ядерная медицина.

Значимость работы: высокая.

Обозначения и сокращения

ИОЛТ – Интраоперационная лучевая терапия;

РИП – Расстояние источник–поверхность;

PDD – Процентная глубинная доза;

ПИ – Плоский источник.

Оглавление

<u>Введение</u>	14
<u>1. Обзор литературы по теме</u>	16
<u>1.1 Электронная терапия</u>	16
<u>1.2 Схема формирования электронного пучка клинического линейного ускорителя</u>	18
<u>2. Расчет характеристик электронного пучка медицинского линейного ускорителя</u>	21
<u>2.1 Моделирование методом Монте-Карло</u>	21
<u>2.2 Программа PCLab «Компьютерная лаборатория»</u>	23
<u>2.3 Последовательный расчет спектра распространения электронного пучка медицинского линейного ускорителя</u>	24
<u>2.4 Определение процентной глубинной дозы пучка электронов в водном фантоме</u>	31
<u>2.5 Расчет характеристик электронов и процентной глубинной дозы на поверхности водного фантома с использованием плоского источника</u>	37
<u>3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..</u>	39
<u>3.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</u>	39
<u>3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования</u>	39
<u>3.1.2 Анализ конкурентных технических решений</u>	40
<u>4.1.3 SWOT-анализ</u>	41
<u>3.2. Планирование научно-исследовательских работ</u>	44
<u>3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования</u>	44

<u>3.2.2 Структура работ в рамках научного исследования</u>	45
<u>3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования</u>	46
<u>3.2.4. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)</u>	49
<u>3.2.4.1 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ</u>	49
<u>3.2.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ</u>	50
<u>3.2.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы</u>	51
<u>3.2.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды</u>	52
<u>3.2.4.5 Накладные расходы</u>	53
<u>3.2.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта</u>	54
<u>3.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</u>	55
<u>4. Социальная ответственность</u>	59
<u>4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов</u>	59
<u>4.2. Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ</u>	61
<u>4.2.1 Организационные мероприятия</u>	61
<u>4.2.2 Технические мероприятия</u>	61
<u>4.2.3 Условия безопасной работы</u>	64
<u>4.3 Электробезопасность</u>	66
<u>4.4 Пожарная и взрывная безопасность</u>	68
<u>Заключение</u>	70
<u>Список используемых источников</u>	72

Введение

Для реализации целей современной лучевой терапии необходимо обеспечить доставку высокой однократной дозы непосредственно к патологическому очагу. Задача не простая, так как любой пучок необходимо предварительно сформировать – создать равномерную плотность потока, с определенными пространственными размерами. В настоящее время использование электронных пучков в лучевой терапии является одним из основных методов облучения злокачественных новообразований. Преимущества применения электронов в радиотерапии обусловлены особенностями их взаимодействия со средой и заключаются в большей однородности дозы в объеме очага и меньшем уровне дозовой нагрузки в окружающих и глубоко залегающих нормальных тканях.

Следует отметить, что для формирования глубинного распределения дозы терапевтического пучка электронов в соответствии с особенностями тела человека, необходимо учесть сложность процессов взаимодействия электронов как вблизи границ раздела двух сред воздух-кожа, так и с внутренними органами различной плотности.

Точный расчет дозового поля в пациенте в настоящее время можно выполнить лишь методом Монте-Карло. Он позволяет учесть все необходимые элементы подготовки пучка и сложную структуру внутренних органов пациента, а также точный учет спектра первичного излучения и его изменения в процессе подготовки пучка [1].

Целью работы является расчет методом Монте-Карло характеристик электронного пучка медицинского линейного ускорителя с учетом типовой схемы формирования пучка.

Были поставлены следующие задачи:

1. Рассчитать спектры электронного пучка в процессе его формирования.

2. Построить распределение плотности электронного пучка на поверхности фантома после прохождения всей системы формирования пучка.
3. Рассчитать глубинное распределение дозы электронного пучка в водном фантоме, при прохождении всей системы формирования пучка.
4. Определить энергию первичного пучка ускоренных электронов, при котором имеет место совпадение расчетных и экспериментальных распределений глубинных доз.
5. Рассчитать плоский источник и глубинное распределение дозы электронного пучка в водном фантоме с использованием этого источника.
6. Оценить уменьшение времени расчета с использованием плоского источника.

1. Обзор литературы по теме

1.1 Электронная терапия

Электронная терапия – лечение потоком электронов, которые ускорены до больших энергий [2]. В электронной терапии используются бетатрон и линейные ускорители. На данный момент, один из основных методов облучения злокачественных новообразований – это лучевая терапия пучками электронов. Преимущества применения электронов в радиотерапии обусловлены особенностями их взаимодействия со средой и заключаются в большей однородности дозы в объеме очага и меньшем уровне дозовой нагрузки в окружающих и глубоко залегающих нормальных тканях, что обеспечивается высоким градиентом дозы в поперечном и продольном направлениях распространения пучка. При этом достигается основная цель лучевой терапии – максимальное поражение опухолевой ткани при минимизации воздействия на нормальную ткань [1].

Современные установки позволяют получать электроны различных энергий. В зависимости от локализации патологического образования проводят облучения электронами с энергиями от 1,5 до 20 МэВ.

Электроны с энергиями от 1,5 до 4,0 МэВ применяются в лечении поверхностных новообразований. В дерматологической практике при необходимости воздействовать на большие поверхности тела определенное значение приобрел метод подвижной электронной терапии (передвижной стол, на котором расположен горизонтально пациент, передвигается в направлении длинной оси тела). Благодаря резкому ограничению пучка электронов по глубине электронной терапии позволяет щадить подлежащие ткани при облучении.

Пучки электронов с энергиями от 10 до 20 МэВ используют в основном для лечения рака шейки матки, легкого и внутричерепных доброкачественных и злокачественных новообразований глиального ряда.

Применяют дозы, обычно используемые в практике гамма- и рентгенотерапии [2].

Электронное излучение относится к корпускулярным видам наряду с излучением нейтронов и протонов. Однако протоны в лучевой терапии используются значительно меньше. Объяснить это можно достаточно просто, ускорители для получения протонов громоздки, значительно сложны в эксплуатации, а также они достаточно дорогие. Современные ускорители электронов ж, напротив, относительно просты как в производстве, так и в эксплуатации. А ещё их преимущество заключается в том, что они позволяют получать пучки достаточно высоких энергий.

К достоинствам медицинских электронных ускорителей отнесем и то, что на них можно получить целый ряд пучков электронов с различными энергиями. Кроме того, подготовка ускорителя для перехода от одной энергии электронов к другой занимает считанные секунды. Это позволяет комбинировать в одной лечебной процедуре сразу несколько полей облучения электронами разных энергий [3].

Энергия излучения и плотности поглощающего вещества влияют на проникающую способность электронов, которая у них не велика. При прохождении через вещество электроны вследствие своей малой массы подвергаются рассеянию, которое повышается с увеличением глубины. Это определяет применение электронов только для поверхностно расположенных опухолей.

На сегодняшний день электроны являются практически единственным видом излучения, используемым при специальном методе облучения, который применяется для сложной геометрии – интраоперационной лучевой терапии (ИОЛТ) в дистанционном варианте [3]. Сущность методики сводится к подведению высокодозного ионизирующего излучения в процессе хирургического лечения именно на место, где находилась опухоль, а также на зоны риска развития рецидива. Преимущество ИОЛТ – это возможность с максимальной точностью, узконаправленно подвести необходимую дозу

радиационного излучения к опухоли, при этом прилежащие органы и ткани не входят в поле воздействия радиации, поэтому снижается возможность развития лучевых реакций. Лечение производится при помощи зонда, который вводится непосредственно в операционное поле [4].

Препятствовать внедрению данного метода в медицинскую практику может недостаточная его дозиметрического обоснования. Так, например, предметом постоянных дискуссий является выбор энергии электронного пучка, наиболее адекватной целям интраоперационного облучения, а также способов формирования полей облучения. Перспективы применения ИОЛТ связаны с совершенствованием технического оснащения, в первую очередь с использованием мобильных ускорителей [4].



Рисунок 1.1 – Электронный ускоритель ИОЛТ (NOVAC 7) во время типичной процедуры

1.2 Схема формирования электронного пучка клинического линейного ускорителя

Современные аппараты для дистанционной лучевой терапии пучками электронов представляют собой линейные ускорители S-диапазона частот (2-4 ГГц) [1]. Форма распределения поглощенной дозы, получаемого в терапевтическом электронном пучке, обычно зависит от конструктивных параметров конкретного терапевтического аппарата намного больше, чем в случае фотонного пучка. Ведь электроны гораздо больше, чем фотоны

рассеиваются и теряют энергию, взаимодействуя с материалами на своем пути [5]. У разных производителей аппаратов, несмотря на некоторые различия в дизайне аппаратов, например, такие как использование ускоряющих структур на стоячей (с полушириной 10%) или бегущей (с полушириной 5%) волне, дизайн магнетрона или клистрона, различия в конструкциях поворотных магнитов в системе транспортировки пучка, все аппараты имеют терапевтическую головку, состоящую из ряда важных частей, связанных с формированием, коллимацией и контролем пучка [6, 7].

На рисунке 1.2 изображена типовая схема формирования электронного пучка.

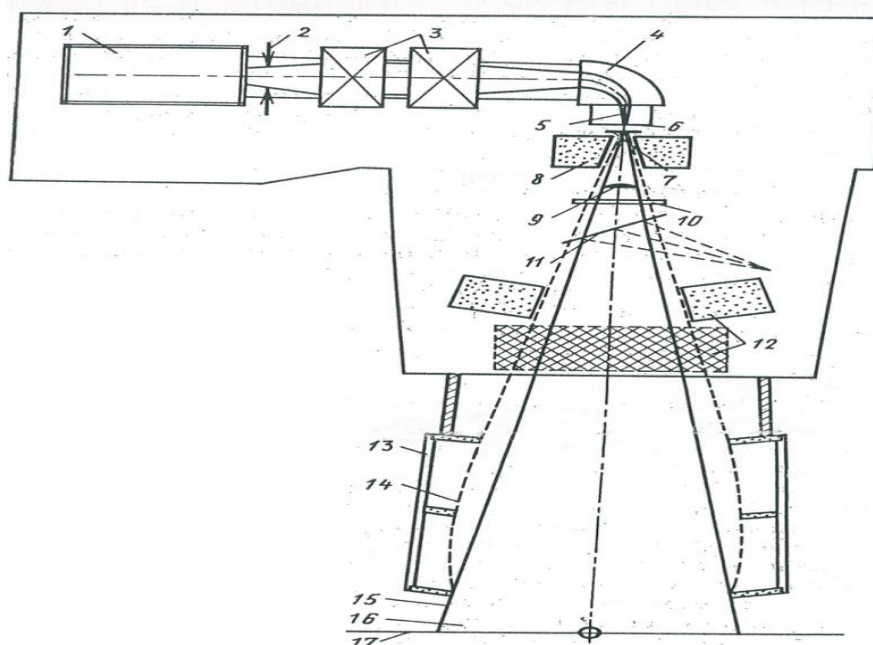


Рисунок 1.2 – Типовая схема формирования электронного пучка

- 1 – ускоритель; 2 – внутренний пучок ускорителя; 3 – линзы; 4 – поворотный магнит;
- 5 – исходный электронный пучок; 6 – вакуумное окно; 7 – первичная рассеивающая фольга;
- 8 – первичный коллиматор; 9 – вторичная рассеивающая фольга; 10 – проходные мониторы;
- 11 – зеркало; 12 – коллиматоры фотонного пучка; 13 – коллиматоры электронного пучка;
- 14 – область коллимирования; 15 – геометрические границы пучка; 16 – изокентры;
- 17 – поверхность пациента.

Рассмотрим, непосредственно, терапевтическую головку линейного медицинского ускорителя, которая состоит из: фольги выводного окна вакуумной камеры; рассеивающей фольги; первого неподвижного коллиматора; двух ионизационных камер; второй рассеивающей фольги; подвижного коллиматора; аппликаторов.

Классическая схема формирования терапевтического пучка электронов современных медицинских ускорителей представляет собой сочетание фильтрующих фольг и коллимирующих устройств. Электронный пучок выходит из ускорительной системы медицинских аппаратов в виде узкого пучка, затем он проходит через систему формирования, состоящую из двух фольг. На первой рассеивающей фольге узкий электронный пучок превращается в расходящийся. Вторая фольга, так называемый выравнивающий фильтр, используется для создания однородного профиля пучка электронов. Большое распространение получили фольги из материалов с большим атомным номером, так как именно они способствуют повышению равномерности пучка. В коллимационную систему ускорителя входят первичный и вторичный коллиматоры, основная функция которых состоит в ограничении размеров сглаженного электронного пучка, а следовательно, в защите от облучения тканей, находящихся вне объёма мишени [1,5].

Ограничения на конструкцию коллимационной системы линейного медицинского ускорителя, связанные с размером и весом терапевтической головки аппарата, привели к появлению дополнительных аппликаторов для формирования полей облучения. Применение подобных устройств, фиксированных по размеру поля и представляющих собой металлические пластины или тубусы, является «золотым стандартом». Передний край такого аппликатора находится на расстоянии 5 см от поверхности пациента в геометрии, где стандартное расстояние источник-поверхность (РИП) составляет 100 см, что позволяет избежать уширения пучка электронов при рассеянии на воздухе и доставить к пациенту поле облучения строго заданной формы [1].

2. Расчет характеристик электронного пучка медицинского линейного ускорителя

2.1 Моделирование методом Монте-Карло

Метод Монте-Карло на сегодняшний день достаточно обширно применяется при решении широкого спектра задач в области моделирования процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, от расчета дозовых нагрузок в области ядерной медицины, до моделирования процессов, изучаемых в физике высоких энергий. Метод Монте-Карло может быть использован для описания любого метода, который аппроксимирует решения количественных задач с помощью статистической выборки. Данный метод считается наиболее точным методом расчета дозы при лучевой терапии. Для полного моделирования линейного ускорителя требуется, чтобы изготовленная информация охватывала все данные, но некоторые данные, такие как первичная энергия электронов, должны быть указаны. Численное моделирование процессов переноса излучений является прецизионным методом расчета, его работоспособность продемонстрирована в значительном числе публикаций [1, 8].

Для работы с высокоэнергетическими электронными пучками необходимо значительно хорошо понимать характер их взаимодействия со средой распространения. Здесь и нашли свое широкое применение расчетные методы, которые в свою очередь позволяют оценивать распределение дозовых полей, исследовать подходы к формированию полей неправильной формы со сложным профилем, а также разрабатывать и испытывать новые узлы ускорителей.

В настоящее время представлен ряд основных семейств кодов на основе метода Монте-Карло, которые достаточно широко используются и считаются эталонными для моделирования процессов переноса ионизирующих излучений в веществе: ETRAN (ITS), EGSnrc, MCNP, PENELOPE и GEANT4. Но данные коды зачастую могут привести к возникновению некоторых отклонений от реальной картины. Это происходит

из-за различного приближения и алгоритмов, используемые в данных кодах, что и приведет к ошибке в расчетах. Как следствие, при изучении возможности применения любого программного пакета необходимо как учитывать существующие ограничения, так и анализировать точность расчетов, например, в сравнении с экспериментальными данными или эталонными расчетами [1].

Для практического применения метода Монте-Карло необходимо построить геометрию формирования терапевтического электронного пучка, способную прогнозировать распределение дозы в объёме поглотителя, основываясь на экспериментально полученных данных. На рисунке 2.1 приведена вся геометрия формирования пучка, которая рассчитывалась методом Монте-Карло. Данная геометрия состояла из: фольги выводного окна вакуумной камеры, которая была выполнена из Ti размерами 55 мкм; рассеивающий фольги из Pb размером 20 мкм; первого неподвижного коллиматора; двух ионизационных камер, стенки которых из Al; второй рассеивающей фольги; подвижного коллиматора из W; аппликаторов.

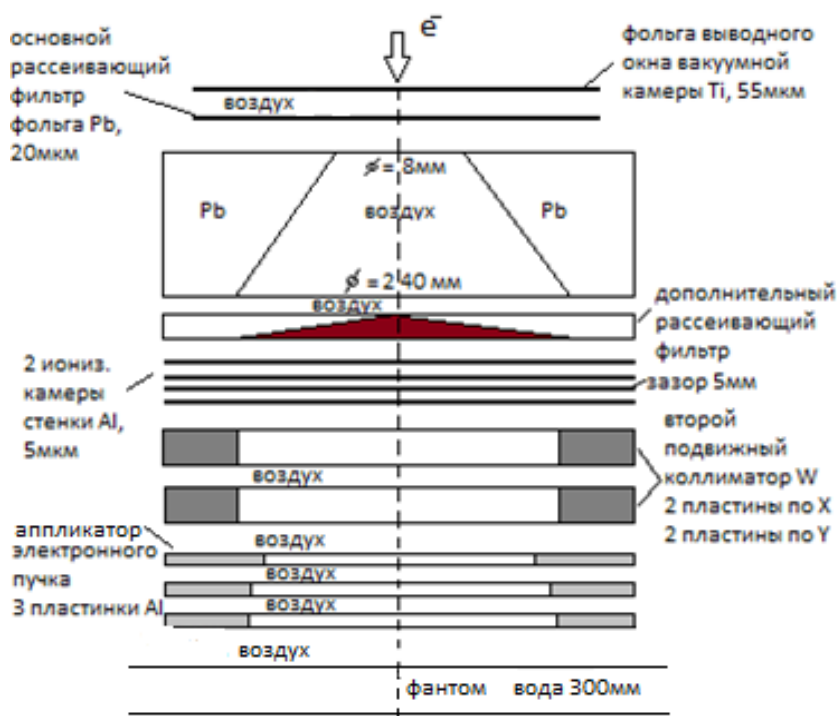


Рисунок 2.1 – Геометрия формирования пучка, которая использовалась для расчета методом Монте-Карло

На рисунке 2.2 приведена та же геометрия формирования пучка, которая рассчитывалась методом Монте-Карло, но уже построенная, непосредственно, в программе PCLab, в которой и проводилось моделирование.

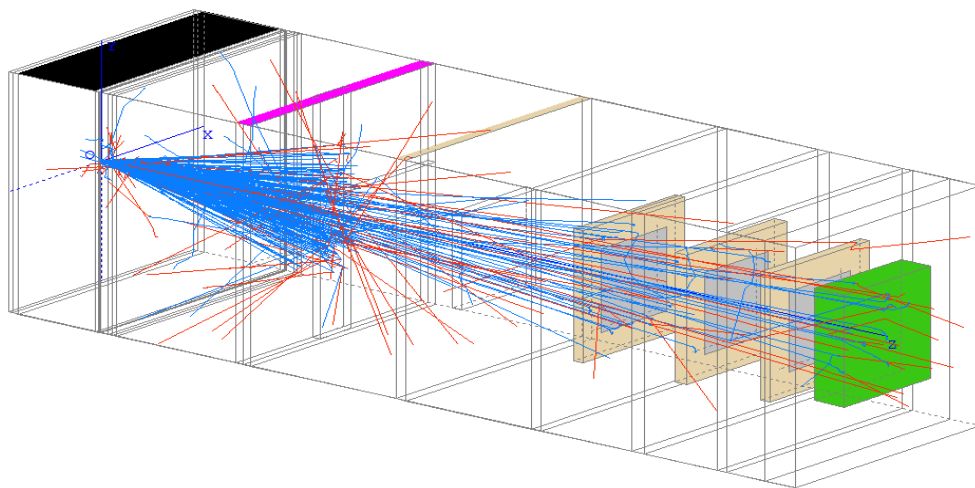


Рисунок 2.2 – Геометрия формирования пучка, рассчитанная в программе PCLab

2.2 Программа PCLab «Компьютерная лаборатория»

Расчет проводился в программе PCLab «Компьютерная лаборатория». Программа PCLab позволяет моделировать методом Монте-Карло процессы переноса ионизирующего излучения в среде. Программа PCLab позволяет получать как интегральные, так и дифференциальные результаты взаимодействия фотонов и заряженных частиц, в том числе и распределения поглощенной энергии и дозы в веществе [9].

При моделировании для электронов и позитронов учитываются типы взаимодействий частиц такие, как эффект аннигиляции для позитронов, ионизационные столкновения, тормозное излучение; при моделировании для фотонов – эффект образования электронно-позитронных пар, эффект Комптона, фотоэффект; для протонов – упругие и неупругие кулоновские столкновения, не учитываются ядерные взаимодействия. Распространение излучения носит каскадный характер. Построение траекторий фотонов проводится в модели индивидуальных столкновений. Данные работы [10] используются в качестве полных сечений взаимодействия фотонов с веществом для энергий частиц менее 100 МэВ. Построение траекторий

заряженных частиц (электронов, позитронов и протонов) проводится в модели группировки малых передач энергии. Учитываются флуктуации, потерь энергии частиц в далеких столкновениях, так же флуктуации продольных и поперечных смещений, которые возникают в результате рассеяния [9].

Численное моделирование распределения дозы пучков электронов в водном фантоме с использованием программы PCLab проводилось в режиме PHANTOM. Режим позволяет рассчитывать трехмерное распределение поглощенной энергии в заданном объеме, спектр налетающих частиц, а также учесть магнитное и электрическое поля при моделировании. Возможен расчет как задач медицинской физики с учетом реальной геометрии дистанционного облучения пучками электронов, нейтронов, фотонов и протонов, так и для других режимов облучения, не связанных с задачами лучевой терапии [9].

Отличительная особенность программы PCLab – упрощенная система ввода данных геометрии эксперимента, не требующая знания языков программирования, что делает программу доступной широкому кругу пользователей. Однако, проведение численного моделирования требует достаточно высоких производительных мощностей компьютера. Результаты моделирования отображаются в онлайн режиме на экране монитора позволяя проводить корректировку входных данных на первоначальном этапе расчета, что позволяет гораздо быстрее выполнить процесс отладки модели [1].

2.3 Последовательный расчет спектра распространения электронного пучка медицинского линейного ускорителя

Для начала расчета методом Монте-Карло нужно подобрать и сформировать пучок, то есть создать равномерный пучок по площади, который и будет падать на водный фантом. Первичным источником являлся спектр линейного медицинского ускорителя на энергию 6 МэВ, круглый пучок диаметром 4 мм. С типичной полушириной 10% (стоячая волна) с нормальным распределением. Средняя энергия и наиболее вероятная энергия

совпадают в данном случае и равняются 6 МэВ. На рисунке 2.3 представлен спектр электронов, падающий на фольгу выводного окна вакуумной камеры.

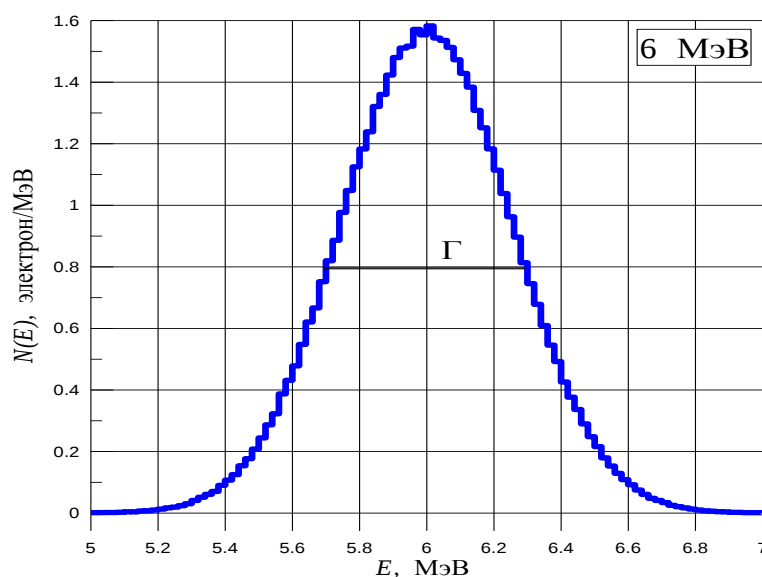


Рисунок 2.3 – Спектр электронов, падающий на фольгу выводного окна вакуумной камеры. $E_v = \langle E \rangle = 6$ МэВ; $\Gamma = 0,6$ МэВ

Сначала рассматривалась зависимость спектральной составляющей от воздуха. В этом случае, электронный пучок проходил фольгу выводного окна вакуумной камеры, 100 см воздуха и попадал на фантом.

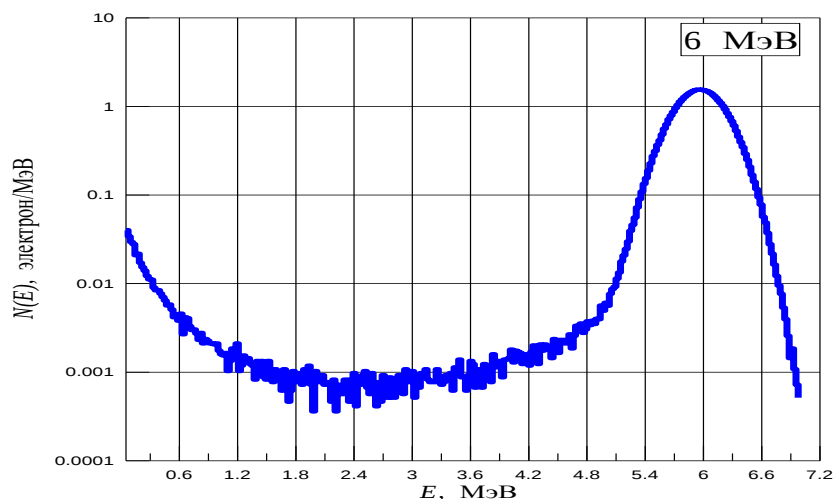


Рисунок 2.4 – Спектр электронов, выходящих из фольги выводного окна вакуумной камеры (Ti, 55мкм). $E_v = 5,93$ МэВ; $\langle E \rangle = 5,9$ МэВ

Из рисунка 2.4 замечаем, что появилось много низкоэнергетических электронов, которые сохранялись на всём пути электронного пучка и влияли на величину поверхностной дозы. Средняя энергия уменьшилась на 1,7 %.

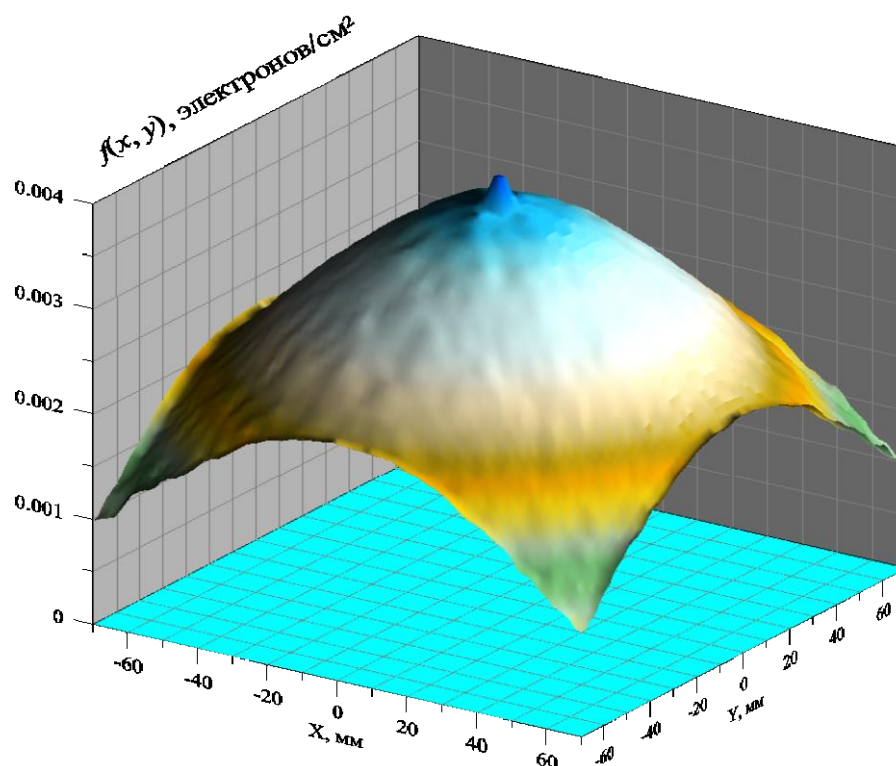


Рисунок 2.5 – Распределение плотности электронов, падающих на поверхность водного фантома, после прохождения выводного окна и воздуха

Из рисунка 2.5 видно, что электронный пучок, пройдя через воздух не создает равномерного распределения, а это значит, что нужно воспользоваться дополнительным построением, а именно: поставить дополнительные фольги для уширения терапевтического пучка электронов; коллиматоры, которые позволяют формировать необходимые терапевтические поля; металлические аппликаторы, которые позволяют снизить вклад рассеяния электронов на воздух.

Дальше в данной работе последовательно рассчитывалось спектральное распределение электронов и потери энергий после прохождения соответствующих устройств подготовки пучка.

На рисунке 2.6 представлен спектр электронов, после первой рассеивающей фольги, из которого следует, что средняя энергия электронов уменьшилась на 2,3%.

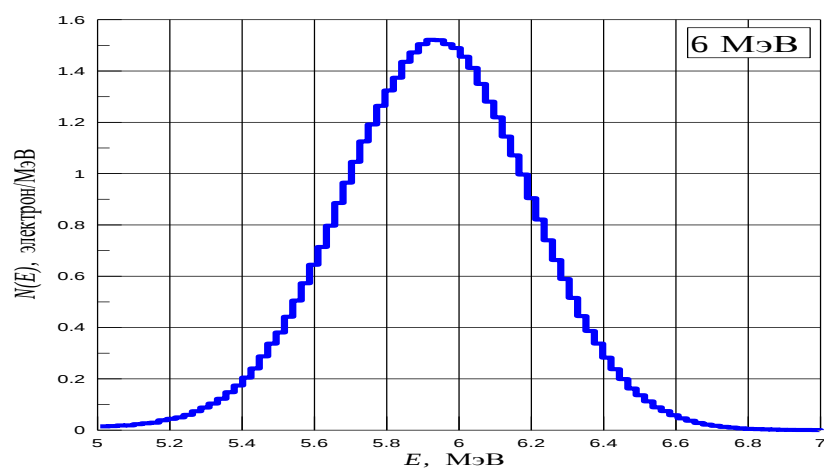


Рисунок 2.6 – Спектр электронов, падающий на первую рассеивающую фольгу (Pb, 20мкм). $E_B=5,91$ МэВ; $\langle E \rangle=5,86$ МэВ

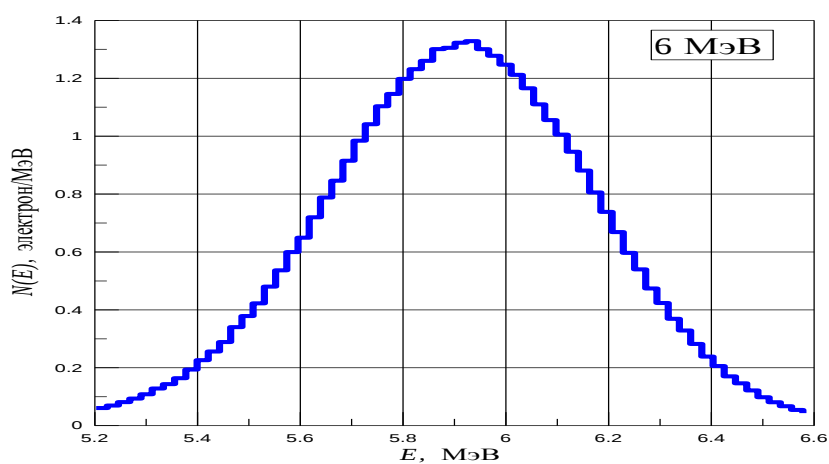


Рисунок 2.7 – Спектр электронов, выходящих из конического свинцового коллиматора $E_B=5,91$ МэВ; $\langle E \rangle=5,81$ МэВ

После конического коллиматора, спектр которого представлен на рисунке 2.7, средняя энергия электронов уменьшилась на 3,2%.

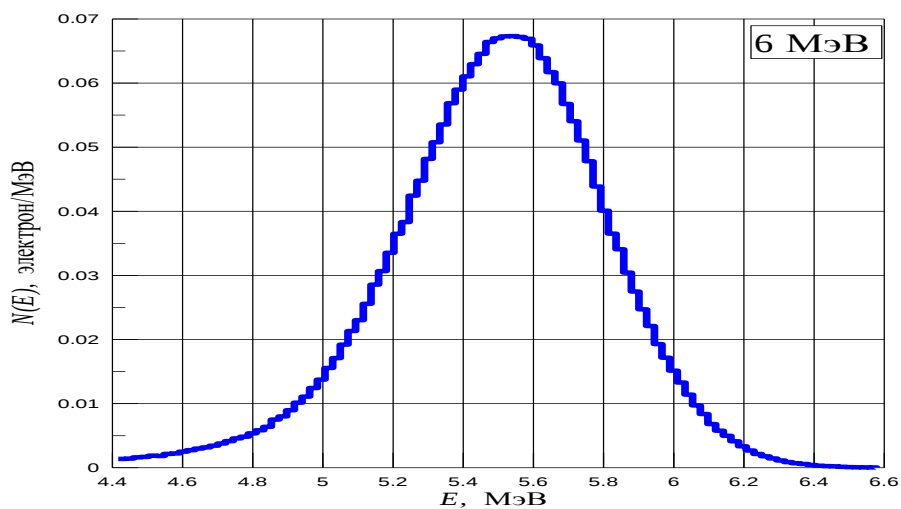


Рисунок 2.8 – Спектр электронов, падающий на фантом, после прохождения 2-й рассеивающей фольги из АБС-пластика. $E_B=5,52$ МэВ; $\langle E \rangle=5,38$ МэВ

После прохождения 2-х рассеивающих фольг, представленных на рисунке 2.8, средняя энергия электронов уменьшилась на 10,3%.

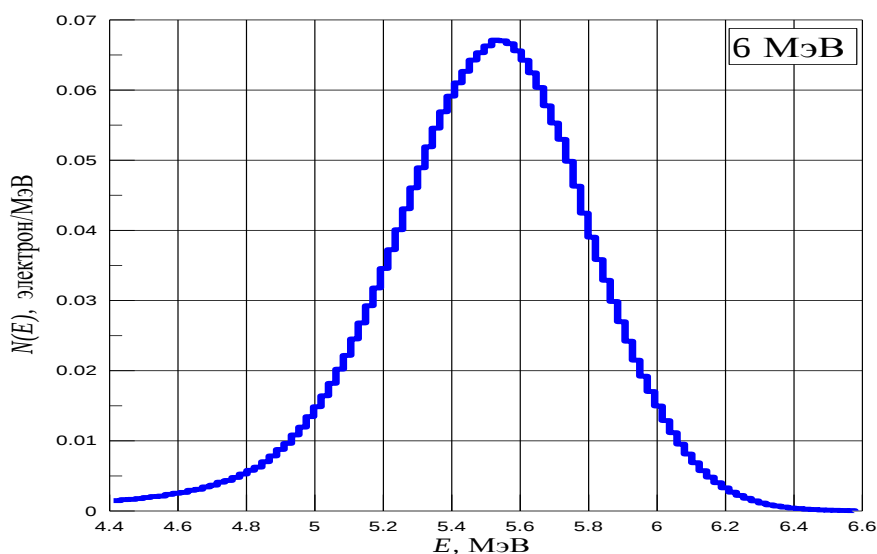


Рисунок 2.9 – Спектр электронов, падающий на фантом, после 2-х ионизационных камер $E_b=5,51$ МэВ; $\langle E \rangle=5,38$ МэВ

После 2-х ионизационных камер, спектр которых представлен на рисунке 2.9, средняя энергия электронов уменьшилась на 10,2%.

На рисунке 2.10 представлен спектр после второго коллиматора, из которого следует, что средняя энергия электронов уменьшилась на 9,9%.

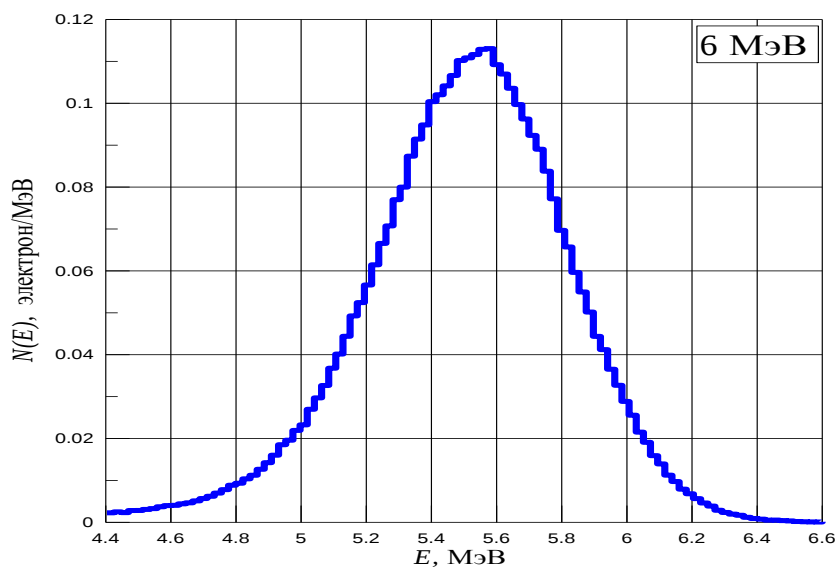


Рисунок 2.10 – Спектр электронов, падающий на фантом, после 2-го подвижного коллиматора. $E_b=5,55$ МэВ; $\langle E \rangle=5,41$ МэВ

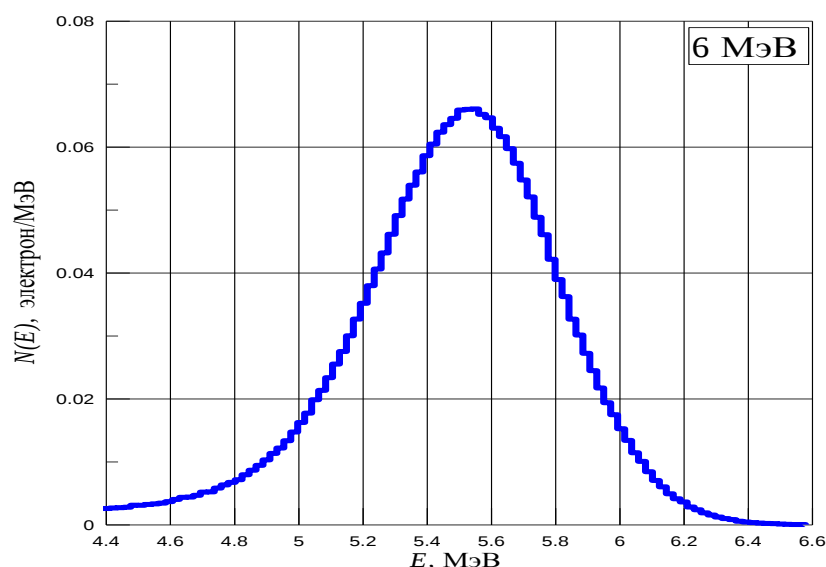


Рисунок 2.11 – Спектр электронов, падающий на фантом, после прохождения всей системы формирования пучка. Вторая рассеивающая фольга из 4-х слоёв АБС-пластика.
 $E_B=5,53$ МэВ; $\langle E \rangle=5,3$ МэВ

После прохождения всей системы формирования пучка со второй рассеивающей фольгой из АБС – пластика, спектр которого представлен на рисунке 2.11, средняя энергия уменьшилась на 11,7%.

Предприняли второй расчет, где вторая рассеивающая фольга была выполнена из алюминия, с теми же геометрическими параметрами. Был построен спектр электронов, который представлен на рисунке 2.12. В этом случае средняя энергия уменьшилась на 14,8%.

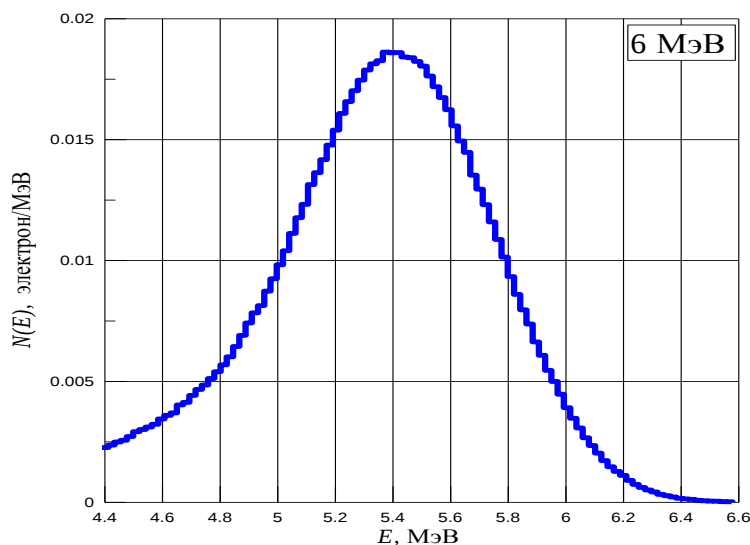


Рисунок 2.12 – Спектр электронов, падающий на фантом, после прохождения всей системы формирования пучка. Вторая рассеивающая фольга их 4-х слоев Al.
 $E_B=5,4$ МэВ; $\langle E \rangle=5,11$ МэВ

Для того, чтобы решить какой из расчетов позволит выполнить более равномерное облучение, были построены графики распределения плотности электронов, падающих на поверхность водного фантома после прохождения всей системы формирования электронного пучка для двух случаев.

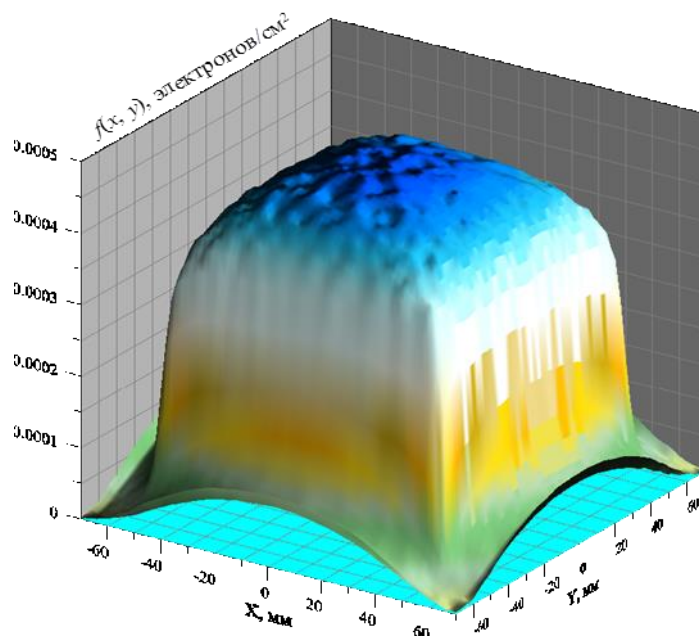


Рисунок 2.13- Распределение плотности электронов, падающих на поверхность водного фантома, после прохождения всей системы формирования пучка. Вторая рассеивающая фольга из 4-х слоёв АБС-пластика.

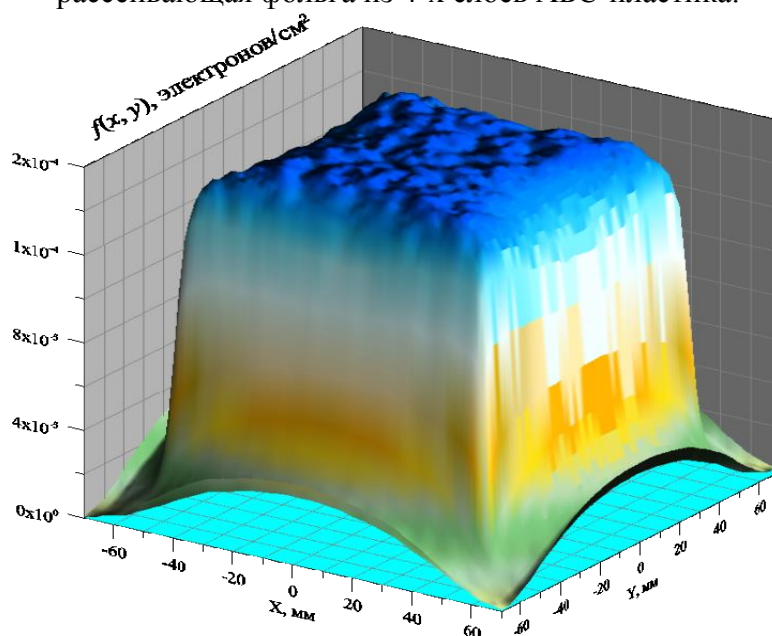


Рисунок 2.14- Распределение плотности электронов, падающих на поверхность водного фантома, после прохождения всей системы формирования пучка. Вторая рассеивающая фольга из 4-х слоёв Al.

После прохождения всей типовой схемы формирования электронного пучка, в которой стояла вторая рассеивающая фольга из четырех слоев АБС-

пластика средняя энергия электронного пучка уменьшилась на 700 кэВ. А при прохождении той же типовой схемы формирования пучка, но уже с другой второй рассеивающей фольгой, которая состояла из четырех слоев алюминия, средняя энергия уменьшилась почти на 900 кэВ.

Проанализировав плотности распределений электронов, падающих на поверхность фантома, был сделан вывод, что более равномерное распределение соответствует случаю, когда вторая рассеивающая фольга состоит из четырех слоев алюминия, но при этом теряется больше средней энергии при прохождении типовой схемы формирования электронного пучка.

В дальнейшем, в работе будет использоваться геометрия со второй фольгой из четырех слоев алюминия.

2.4 Определение процентной глубинной дозы пучка электронов в водном фантоме

Для практического применения метода Монте-Карло необходимо построить геометрию формирования терапевтического электронного пучка, способную прогнозировать распределение дозы в объёме поглотителя, основываясь на экспериментально полученных данных. Для таких целей удобно использовать такую характеристику как глубинное распределение дозы, определенную по центральной оси пучка для каждой энергии электронов конкретного терапевтического ускорителя.

Глубинная доза – это доза, измеренная на определенной глубине от поверхности облучаемого объекта. Отношение дозы на глубине к дозе в свободном воздухе, выраженное в процентах, называется относительной, или процентной глубинной дозой. [11] Кривая процентной глубинной дозы в общем случае характеризуется следующими параметрами:

D_s – относительная поглощённая доза на поверхности фантома, определяется на глубине 0,05 см;

D_x – относительная поглощённая доза, обусловленная вкладом тормозного излучения возникающего вследствие взаимодействия пучка электронов с элементами аппарата, формирующими поле облучения, и телом пациента (для пучков электронов с энергиями менее 10 МэВ вклад рентгеновского излучения составляет ~3%, с энергиями более 40 МэВ – $\geq 10\%$;

$D_{\max}$ – максимальное значение поглощенной дозы в водном фантоме для заданных параметров облучения (энергия электронов, расстояние источник-поверхность, размер поля и т.д.)

$d_{\max}$ или R_{100} – глубина в водном фантоме соответствующая положению максимального значения поглощённой дозы $D_{\max}$;

R_t или R_{90} – терапевтический диапазон, определяется как глубина залегания 90% относительной поглощенной дозы от уровня $D_{\max}$, представляет собой область клинически полезной части профиля глубинной дозы пучка электронов;

R_{50} – глубина, на которой максимальное значение поглощенной дозы уменьшается в два раза;

R_p – практический диапазон, определяется глубиной в точке пересечения уровня фона, определяемого вкладом тормозного излучения $\%D_x$ с экстраполяционной прямой линейного участка спада кривой глубинного распределения дозы [1].

Рисунок 2.15 иллюстрирует общий вид кривой процентной глубинной дозы (PDD) в водном фантоме с вышеописанными параметрами, характеризующими пучок электронов.

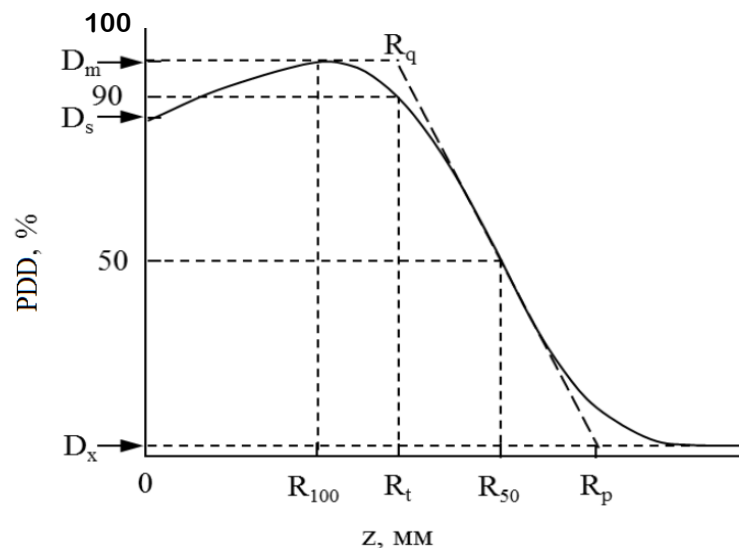


Рисунок 2.15 – Общий вид центрально-осевой процентной глубинной дозы пучка электронов в водном фантоме

Измерение глубинной дозы для энергии клинического пучка электронов позволяет определить такие параметры как наиболее вероятная энергия и средняя энергия фантома, а также практический диапазон и глубину, на которой максимальное значение поглощенной дозы уменьшается в два раза. Данные характеристики пучка электронов как раз и позволяют создать численную модель источника, приближенную к реальности. Медицинские ускорители работают как на стоячих волнах, так и на бегущих, поэтому исследовалось распределение процентной глубинной дозы как на энергии с полушириной 10%, так и на энергии с полушириной 5 %.

В расчете были использованы процентные глубинные распределения поглощенной дозы пучка электронов в водном фантоме, экспериментально полученные на ускорителе ONCOR Impression Plus фирмы Simens (Московская городская онкологическая больница №62). На основе использованных данных, были определены параметры кривой процентной глубинной дозы и энергии на поверхности фантома.

Приведены расчеты с начальными энергиями, под которыми будем понимать наиболее вероятную энергию пучка. На рисунке 2.16 приведены процентные глубинные дозы для PCLab, GEANT4, экспериментальные данные ускорителя ONCOR.

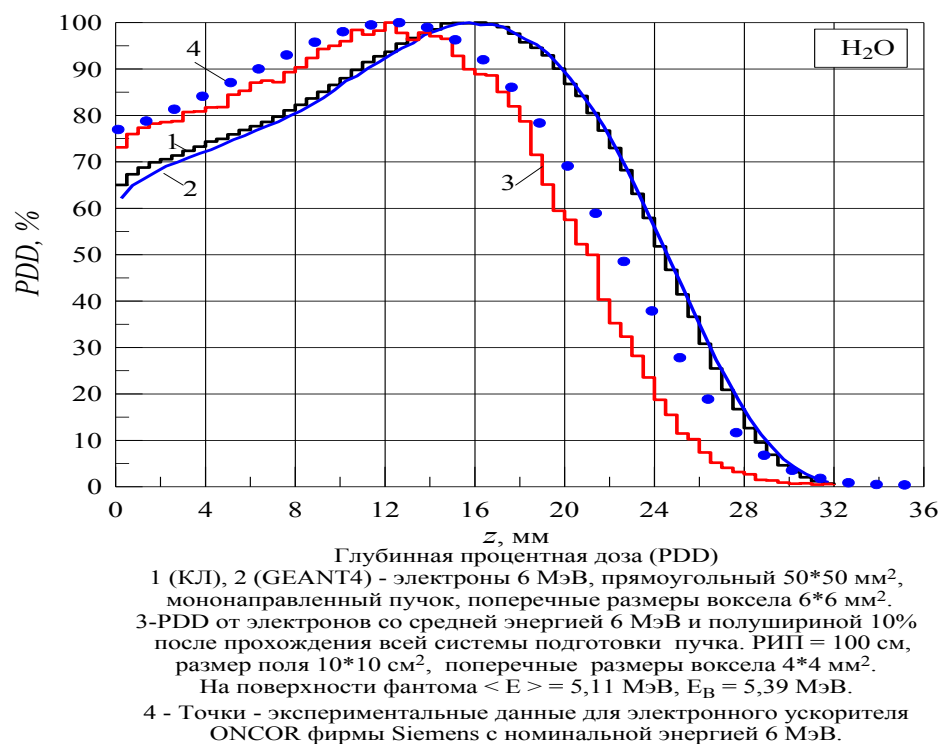


Рисунок 2.16 – Распределение процентной глубинной дозы

Проанализировав и сравнив рассчитанные и экспериментальные данные в программе PCLab можно сказать, что совпадения в данных результатах не было достигнуто. В таблице 2.1 приведены параметры сравнения полученных результатов эксперимента и моделирования в программе PCLab.

Таблица 2.1 – Параметры кривой глубинной дозы и значения энергии на поверхности фантома

Параметры сравнения	Расчет в PCLab	ONCOR
R_p (см)	2,6	2,8
$E_{p,0}$ (МэВ)	5,4	5,8
R_{50} (см)	2,15	2,2
$\bar{E}_0$ (МэВ)	5	5,1

Для совпадения в рассчитанных и экспериментальных данных были проведены расчеты с различными начальными энергиями. Для начала, зная сколько теряется энергии при прохождении всей геометрии электронного пучка, была задана начальная энергия 6,9 МэВ с полушириной 10%.

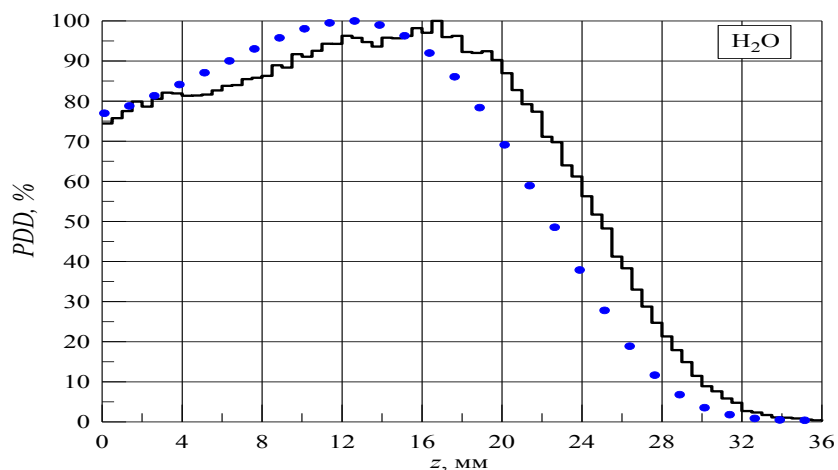


Рисунок 2.17 – Распределение глубинной процентной дозы.
Точки – экспериментальные данные с номинальной энергией 6 МэВ.
Гистограмма – расчет в PCLab с энергией 6,9 МэВ, с полушириной 10%.

Из рисунка 2.17 заметно, что глубинное процентное распределение расчета не совпало с экспериментальными значениями.

Следующий расчет проводился с энергией 6,6 МэВ с полушириной 10%, представленный на рисунке 2.18. Добиться нужного соответствия не удалось.

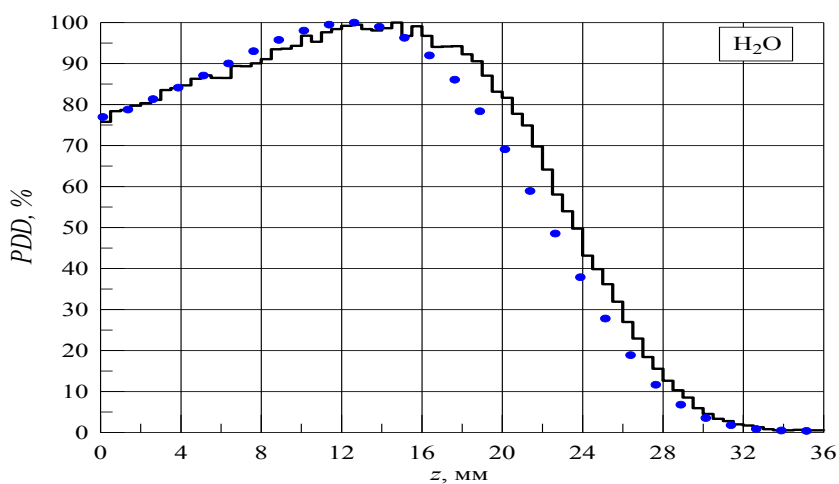


Рисунок 2.18 – Распределение глубинной процентной дозы.
Точки – экспериментальные данные с номинальной энергией 6 МэВ.
Гистограмма – расчет в PCLab с энергией 6,6 МэВ, с полушириной 10%.

Далее проводились расчеты с энергией 6,3 МэВ как с полушириной 10%, так и с полушириной 5%.

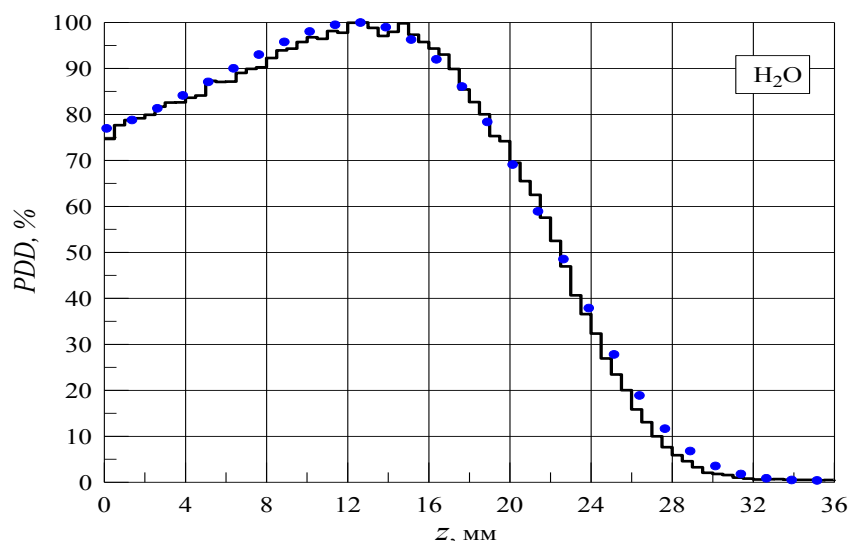


Рисунок 2.19 – Распределение глубинной процентной дозы.
Точки – экспериментальные данные с номинальной энергией 6 МэВ
Гистограмма – расчет в PCLab с энергией 6,3 МэВ, с полушириной 10%

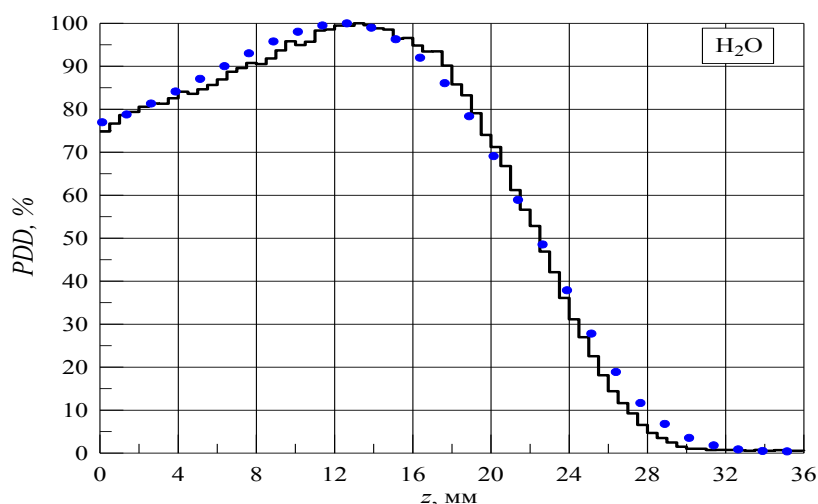


Рисунок 2.20 – Распределение глубинной процентной дозы.
Точки – экспериментальные данные с номинальной энергией 6 МэВ
Гистограмма – расчет в PCLab с энергией 6,6 МэВ, с полушириной 5%

Из рисунков 2.19 и 2.20 заметно, что распределение глубинной процентной дозы соответствует экспериментальным значениям.

Таким образом, было выявлено, что номинальная энергия 6 МэВ, заданная на ускорителе ONCOR, не соответствует начальной энергии падения электронов 6 МэВ, а соответствует рассчитанной энергии ускоренных электронов 6,3 МэВ. Далее в расчетах будет использоваться найденная энергия ускоренных электронов 6,3 МэВ.

2.5 Расчет характеристик электронов и процентной глубинной дозы на поверхности водного фантома с использованием плоского источника

«Плоским источником» (ПИ) условно называем источник электронов, который формируется при пересечении электронами определенной плоской поверхности. Располагается, как правило, вблизи облучаемой поверхности. ПИ содержит в себе характеристики электронов пересекающих данную поверхность: энергию, X и Y координаты, направление (Ω_x , Ω_y , Ω_z), Z координата одна и та же.

Для проведения расчета для начала рассчитывался сам прямоугольный ПИ, который был расположен в заданной геометрии формирования терапевтического электронного пучка в слое воздуха, после расположения аппликаторов. Размеры его задавались размерами аппликатора.

На рисунке 2.21 представлено спектральное распределение электронов в водном фантоме с использованием ПИ.

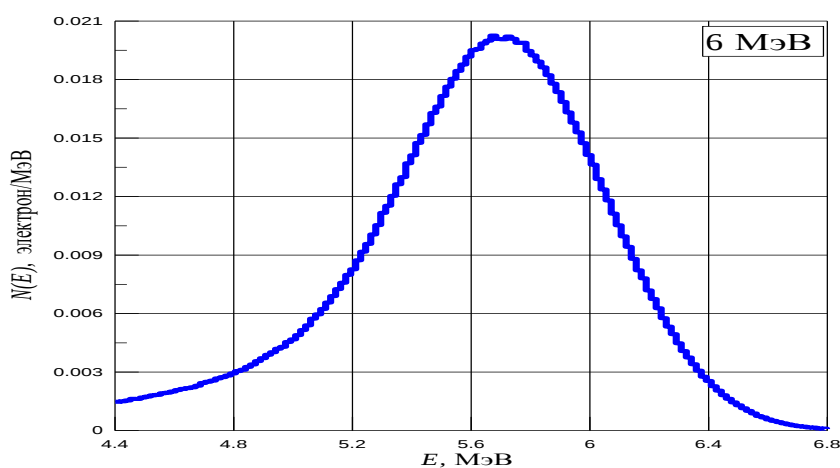


Рисунок 2.21 – Спектральное распределение электронов, падающих на фантоме (с ПИ). $E_b=5,7$ МэВ; $\langle E \rangle=5,36$ МэВ

После того, как был насчитан ПИ с большим количеством частиц ($3,8 \cdot 10^8$ историй), расчет длился более 135 часов, был проведен расчет с следующей геометрией: ПИ, 5 см воздуха, водный фантом, который длился 9 часов.

На рисунке 2.22 представлено распределение глубинной процентной дозы в водном фантоме, при прохождении данной геометрии.

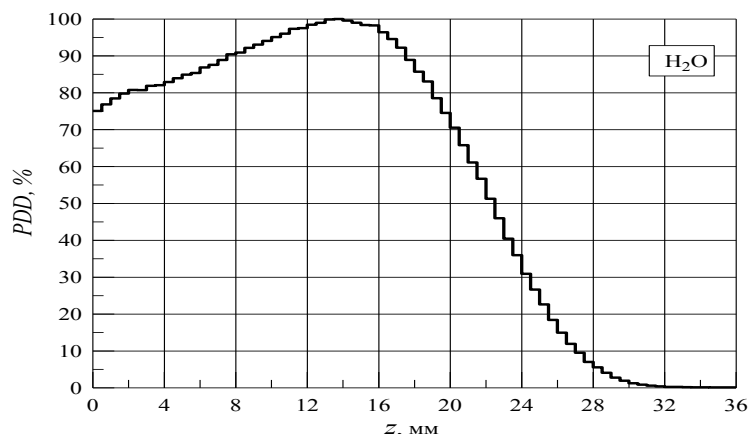


Рисунок 2.22 – Распределение глубинной процентной дозы (с ПИ)

Далее выполнялось сравнение глубинного процентного распределения с использованием ПИ и без него (рисунок 2.23).

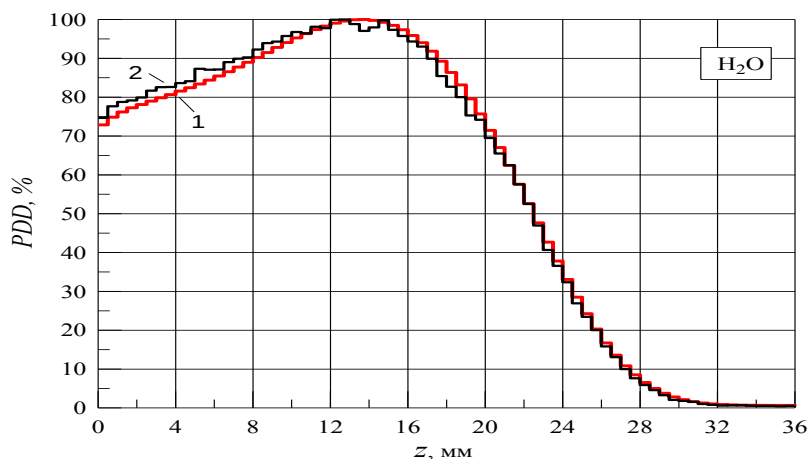


Рисунок 2.23 – Сравнение распределений глубинных процентных доз в фантоме
1 – с ПИ, 2 – без ПИ.

Из рисунка 2.23 заметно, что результаты двух расчетов как с использованием ПИ, так и без него совпадают. Расчет с использованием ПИ длился по времени 9 часов. Данный расчет проводился на ноутбуке с небольшой скоростью процессора. Другой расчет без использования ПИ длился более 135 часов. Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование ПИ позволяет значительно сократить время расчета. Это позволит более эффективно и значительно быстрее выполнить тот или иной расчет, результаты которого могут использоваться в лучевой терапии.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

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

В данной работе основной целью являлось моделирование методом Монте-Карло характеристик электронного пучка медицинского линейного ускорителя с учетом типовой схемы формирования пучка.

3.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

3.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является возможность исследования различных характеристик электронного пучка медицинского линейного ускорителя, который применяется в лучевой терапии. Это позволит гораздо быстрее, точнее и эффективнее производить лечение онкобольных пациентов.

Целевым рынком данного исследования будут являться медицинские организации, которые основаны на лечении онкобольных пациентов.

Перед тем, как была выбрана тема исследования, был произведен анализ потребителей. В качестве потребителей были выбраны способы лечения онкологических заболеваний, используемых в России. Вторым критерием были выбраны разновидности рака. В таблице 3.1 представлена карта сегментирования рынка используемых методов лечения онкозаболеваний в России.

Таблица 3.1 – Карта сегментирования рынка

		Вид лечения		
		Химиолучевая терапия	Лучевая терапия	Хирургия и лучевая терапия
	Глотка	20,1 %	17,5 %	50,4 %
	Шейка матки	10,9 %	22,7 %	-
	Предстательная железа	2,5 %	13,7 %	34,2 %

Исходя из карты сегментирования рынка, можно сделать вывод, что из перечисленных разновидностей заболеваний и способов их лечения преобладает комплексный метод терапии – хирургия и лучевая терапия. Лучевая терапия, как метод лечения, используется давно, что и является причиной наиболее частого использования этого метода относительно химиолучевой терапии. Именно поэтому и было выполнено исследование, в котором применяются медицинские линейные ускорители.

3.1.2. Анализ конкурентных технических решений

Для анализа конкурентных технических решений был взят метод моделирования Монте-Карло в программе Giant (K1), так как данная программа гораздо часто применяется для данных задач. В оценочной карте, указанной в таблице 3.2 приведены сильные и слабые стороны конкурента.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 3.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{кл}	К _ф	К _{кл}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Достоверность полученных данных	0,35	5	3	1,75	1,05
2.Помехоустойчивость детектирующих устройств	0,2	4	2	0,8	0,4
3. Надежность полученных данных	0,12	4	3	0,48	0,36
4.Простота эксплуатации	0,15	5	4	0,75	0,6
5. Удобство в эксплуатации	0,1	5	3	0,5	0,3
6. Энергоэкономичность	0,08	4	5	0,32	0,4
Итого:	1	-	-	4,6	3,11

На основании представленного выше анализа можно сделать вывод, что исследованная в данной диссертационной работе является наиболее пригодной для эксплуатации. Метод моделирования Монте-Карло в программе Giant, который рассматривался как конкурент во многих критериях оценки ресурсоэффективности уступает нашему методу моделирования Монте-Карло в программе PCLab.

3.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой

комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. [12]

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

В таблице 3.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки. В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

Таблица 3.3 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта			
	C1	C2	C3	C4
B1	+	–	+	+
B2	+	+	+	+

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – SWOT-анализ

	Сильные стороны проекта: С1. Относительная простота обработки результатов. С2. Значительное короткое время выполнения расчетов. С3. Достоверность полученных данных. С4. Неиспользование реального оборудования.	Слабые стороны проекта: Сл1. Универсальный подход. Сл2. Необходимость в большом количестве историй в процессе расчета для точного результата.
Возможности: В1. Возможность создания новых режимов работы. В2. Дополнительный спрос на результаты исследования.	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»: 1. Обеспечение условий проведения экспериментов. 2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики.	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»: 1. Наличие дополнительного спроса на результаты расчетов также позволит устранить главные недостатки проекта.
Угрозы: У1. Наличие аналогичных разработок моделирования у конкурирующей стороны.	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: 1. Наличие аналогового моделирования конкурирующих сторон не позволяет в столь короткое время, как наше, выполнить нужные расчеты.	Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: 1. Проведение аналогичных экспериментов конкурирующими фирмами, однако перечисленные нами возможности способны в кратчайшие сроки предотвратить все негативные последствия.

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества данного исследования преобладают над его недостатками. Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

3.2 Планирование научно-исследовательских работ

3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1.	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
	2.	Подбор и изучение материалов по данной теме	Студент
	3.	Календарное планирование работ	Руководитель, студент
	4.	Создание файлов данных для моделирования	Студент
	5.	Процесс моделирования	Студент

Продолжение таблицы 3.5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
	6.	Анализ полученных результатов моделирования	Студент
	7.	Построение графиков в графическом пакете	Студент
	8.	Способ уменьшения времени моделирования	Руководитель, студент
	9.	Составление пояснительной записки	Студент, руководитель
	10.	Проверка правильности выполнения ГОСТа	Руководитель, студент

3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов [13]. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож(i)}$ используется следующая формула:

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

где $t_{ож(i)}$ – 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.

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 %.

$$T_{p(i)} = \frac{t_{ож(i)}}{Ч_i}, \quad (3)$$

где $T_{p(i)}$ – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож(i)}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

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

3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{k(i)} = T_{p(i)} * k_{кал}, [дн.], \quad (4)$$

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

$T_{p(i)}$ – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (5)$$

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

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

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

Тогда:

$$k_{кал} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22.$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе необходимо округлить до целого числа. Все значения, полученные при расчетах по вышеприведенным формулам, приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{p(i)}$		Длительность работ в календарных днях $T_{к(i)}$	
	$t_{min(i)}$, чел - дни		$t_{max(i)}$, чел - дни		$t_{ож(i)}$, чел – дни					
	С	Р	С	Р	С	Р				
Составление и утверждение технического задания	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Подбор и изучение материалов по данной теме	7	7	12	12	9	9	4,5	4,5	5	5
Календарное планирование работ	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1
Создание файлов данных для моделирования	9	-	11	-	10	-	10	-	12	-
Процесс моделирования	26	-	28	-	27	-	27	-	33	-
Анализ полученных результатов моделирования	9	-	11	-	10	-	10	-	12	-
Построение графиков в графическом пакете	8	-	9	-	8	-	8	-	10	-
Способ уменьшения времени моделирования	6	4	7	5	6	4	3	2	4	2
Составление пояснительной записки	3	4	4	5	3	4	3	4	4	5
Проверка правильности выполнения ГОСТа	1	2	2	3	1	2	0,5	1	0,6	1

В таблицах 3.7 и 3.8 приведен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 3.7 – Календарный план-график проведения научного исследования на осенний семестр

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ														
				Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
2019 год																		
1	Составление и утверждение технического задания	Рук-ль	1															
2	Подбор и изучение материалов по данной теме	Рук-ль, студент	5							 								
3	Календарное планирование работ	Рук-ль студент	1							 								
4	Создание файлов данных для моделирования	Студент	12															
5	Процесс моделирования	Студент	33															
6	Анализ полученных результатов моделирования	Студент	12															

Таблица 3.8 – Календарный план-график проведения научного исследования на весенний семестр

№ работ	Вид работ	Исполнитель и	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
2017 год																	
7	Построение графиков в графическом пакете	Студент	10														
8	Способ уменьшения времени моделирования	Рук-ль, студент	4														
9	Составление пояснительной записки	Рук-ль, студент	5														
10	Проверка правильности выполнения ГОСТа	Студент	1														

3.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением [14]. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных(экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

3.2.4.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_m = (1 + k_{tz}) \sum_{i=1}^m Ц_i * N_{расх(i)}, \quad (6)$$

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

$N_{расх(i)}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, и т.д.);

$Ц_i$ – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, и т.д.);

k_{tz} – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, занесены в таблицу 3.9.

Таблица 3.9 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения, шт	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы 3м, руб.
Бумага	шт.	500	0,5	250
Ручка	шт.	3	40	120
Карандаш	шт.	3	20	60
Ластик	шт.	1	15	15
Итого, руб.:		445		

3.2.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Для данной исследовательской работы не приобреталось специальное оборудования, поэтому его стоимость будет рассматриваться как амортизационные отчисления.

Расчет бюджета затрат на используемое в работе оборудование приведен в таблице 3.10.

Таблица 3.10. Бюджет затрат на специальное оборудование

Наименование оборудования	Количество, шт	Амортизационные отчисления каждый месяц, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
Системный блок ПК	1	18600	18600
Монитор	1	4800	4800
Клавиатура	1	350	350
Мышь	1	200	200
Программа PCLab «Компьютерная лаборатория»	1	1800	1800
Итого, руб.:	25750		

3.2.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается 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.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} * T_p, [\text{руб.}], \quad (7)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дней;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m * M}{F_d}, [\text{руб.}], \quad (8)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно технического персонала, раб. дни (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Студент
Календарное число дней	365
Количество нерабочих дней: – выходные дни; – праздничные дни.	52 14
Потери рабочего времени: – отпуск; – невыходы по болезни.	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	251
Примечание: для руководителя и научного сотрудника баланс рабочего времени соответствует выше изложенному	

Для бакалавра месячный оклад определяется его стипендией и соответствует 1906 руб. (без районного коэффициента). Районный коэффициент k_p для города Томска равен 1,3.

Заработная плата для студента по формуле (8):

$$З_{дн} = \frac{1906 * 10,4 * 1,3}{251} = 102 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата по формуле (7):

$$З_{осн} = 102 * 27 = 2754 \text{ руб.}$$

Денежная выплата для научного руководителя определяется по тому, сколько часов руководитель проводил консультацию со студентом. Данная выплата определяется как надбавка к основной заработной плате. Районный коэффициент не учитывается. Время, которое руководитель выделяет на работу с ВКР бакалавра равняется 20 раб. ч. Заработная плата руководителя составляет 250 руб./ч. Тогда заработная плата научного руководителя будет равна:

$$З_{осн} = 250 * 20 = 5000 \text{ руб.}$$

Расчет заработной платы представлен в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Расчет основной заработной платы

Исполнитель	$З_{дн}$, руб.	k_p	T_p , раб. дни	$З_{осн}$, руб.
Руководитель	250	-	2,5	5000
Студен	102	1,3	27	2754
Итого, руб.:	7754			

3.2.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды $Z_{внеб}$ определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб}(Z_{осн} + Z_{доп}), [\text{руб.}], \quad (9)$$

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

$Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30 %. На основании пункта 6 ч.1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2019г. водится пониженная ставка 28 %.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	Отчисления во внебюджетные фонды, руб.
Руководитель	5000	28 %	1400
Студент	2754	28 %	771
Итого, руб.:	2171		

3.2.4.5 Накладные расходы

Основные работы для ВКР проводились за ПК в комнате жилого дома. Время, проведенное за ПК – 1090 часов. Мощность рабочей станции – 0,065 кВт. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} * P * F_{об}, [\text{руб.}], \quad (10)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (2,45 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

По формуле (10) затраты на электроэнергию составили 173,6 рублей.

Помимо всего перечисленного был использован интернет для поиска необходимой информации. Стоимость месячного обслуживания – 350 рублей, время использования — 1,5 месяца. Соответственно, затраты на использовании интернета составили 525 рублей.

При итоговой защите ВКР необходимо распечатать с электронного носителя на бумагу основной текст ВКР. Стоимость печати одного листа формата А4 составляет 3 рубля. Количество страниц ВКР – 70. Соответственно, стоимость печати составила 210 рублей. Итоговые накладные расходы - 908,6 руб.

3.2.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 3.14.

Таблица 3.12 – Бюджет затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты НТИ	445
Затраты на специальное оборудование	25750
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	7754
Отчисления во внебюджетные фонды	2171
Накладные расходы	908,6
Итого, руб.:	37028,6

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

Определение эффективности происходит на основе расчет интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности [15].

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:

$$I_{\text{фин}}^{\text{спи}(i)} = \frac{\Phi_{\text{п}(i)}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (11)$$

где $I_{\text{фин}}^{\text{спи}(i)}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{\text{п}(i)}$ – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{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 размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Для сравнения бюджета затрат были выбраны два других варианта исполнения научного исследования:

- использование ноутбука и программы PCLab;
- использование ПК и программы Giant.

Стоимость ноутбука и программы PCLab – 28400 руб., стоимость ПК и программы Giant – 26650 руб. Стоимость проекта с использованием ноутбука и программы PCLab – 39678,6, стоимость проекта с использованием ПК и программы Giant – 37928,6.

Тогда интегральный финансовый показатель для трех разработок определяется как:

$$I_{\text{фин}}^{\text{спи}(1)} = \frac{37028,6}{39678,6} = 0,933;$$

$$I_{\text{фин}}^{\text{спи}(2)} = \frac{37928,6}{39678,6} = 0,956;$$

$$I_{\text{фин}}^{\text{спи}(3)} = \frac{39678,6}{39678,6} = 1.$$

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

$$I_{p(i)} = \sum a_i * b_i, \quad (12)$$

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

a_i – весовой коэффициент i-го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i-го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Оценка объекта исследования		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Срок годности	0,2	5	4	4
Энергосбережение	0,15	4	4	4
Время расчетов	0,15	5	5	4
Удобство в эксплуатации	0,25	4	4	4
Надежность	0,25	4	4	4
Итого:	1	22	21	20

$$I_{p-исп1} = 5 * 0,2 + 4 * 0,15 + 5 * 0,15 + 4 * 0,25 + 4 * 0,25 = 4,35;$$

$$I_{p-исп1} = 4 * 0,2 + 4 * 0,15 + 5 * 0,15 + 4 * 0,25 + 4 * 0,25 = 4,15;$$

$$I_{p-исп1} = 4 * 0,2 + 4 * 0,15 + 4 * 0,15 + 4 * 0,25 + 4 * 0,25 = 4.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп(i)} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{фин}^{спи(i)}}. \quad (13)$$

Тогда:

$$I_{исп(1)} = \frac{4,35}{0,933} = 4,66;$$

$$I_{исп(2)} = \frac{4,15}{0,956} = 4,34;$$

$$I_{исп(3)} = \frac{4}{1} = 4.$$

Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{cp}$):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп(i)}}{I_{исп(i+1)}} \quad (14)$$

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп(1)}}{I_{исп(3)}}, \mathcal{E}_{cp} = \frac{4,66}{4} = 1,165;$$

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп(1)}}{I_{исп(2)}}, \mathcal{E}_{cp} = \frac{4,66}{4,34} = 1,074;$$

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп(2)}}{I_{исп(3)}}, \mathcal{E}_{cp} = \frac{4,34}{4} = 1,085.$$

Эффективность разработки представлена в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Эффективность разработки

Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Интегральный финансовый показатель разработки	0,933	0,956	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,66	4,34	4
Интегральный показатель эффективности	4,66	4,34	4
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,165	1,074	1,085

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более дешевый вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. По данным таблицы 3.16 можно сделать вывод, что наш вариант моделирования является наиболее дешевым вариантом решения поставленной технической задачи.

4. Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [16].

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

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

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

4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

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

психофизиологические. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – 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	
	Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне	-	
	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)	-	
	-	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	-	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ

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

На инженера, работа которого связана с моделированием на компьютере, воздействуют следующие факторы:

– физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения;

– психофизиологические

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

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

4.2.1 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.

4.2.2 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, как показано на рисунке 4.1.

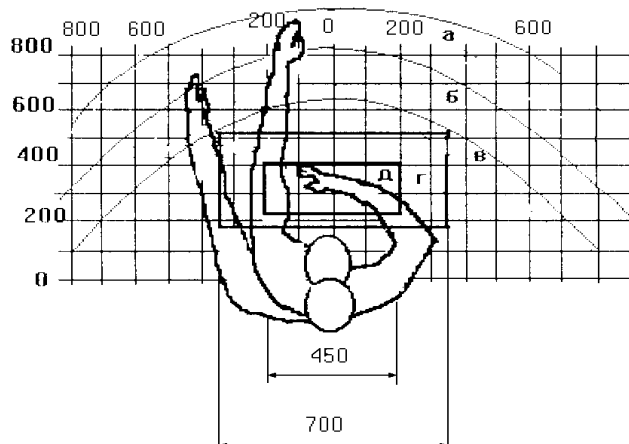


Рисунок 4.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

- а – зона максимальной досягаемости рук;
- б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в – зона легкой досягаемости ладони;
- г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура — в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);

Документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони — в (слева) — литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола — литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для

ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а 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 заглаблённым передним краем.

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

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

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

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

напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

4.2.3 Условия безопасной работы

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

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [17] и приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

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

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность^о–40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом^о–20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. 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 [17] 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.

4.3 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);

- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки;

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает различное воздействие на различные системы организма.

Виды действия электрического тока на организм:

- электрические травмы;

- электрические удары

Электрические травмы – это местные поражения тела: ожоги, металлизация кожи, механические повреждения организма.

Электрический удар вызывает возбуждение живых тканей организма проходящие через него электрическим током, сопровождающиеся непроизвольными судорожными сокращениями мышц, в том числе мышц сердца и легких. В результате могут возникнуть различные нарушения жизнедеятельности организма и даже полное прекращение деятельности дыхания и кровообращения.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;

- вывешивание плакатов, указывающих место работы;

- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;

- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклчение в корпус токоведущих частей) [18].

4.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно с [19], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

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

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

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

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

- 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.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Заключение:

В ходе работы было рассчитано изменение спектра электронного терапевтического пучка при прохождении всей системы формирования пучка. Наибольшие потери энергии пучка происходят в воздухе и рассеивающих фольгах.

Было выявлено, что в слое воздуха 100 см теряется 100 кэВ энергии. При использовании второй рассеивающей фольги из 4-х слоев АБС-пластика в геометрии формирования пучка теряется 700 кэВ энергии, а при использовании второй рассеивающей фольги из материала с большим атомным номером (Al) в той же геометрии – теряется 900 кэВ. В слое воздуха 100 см теряется 100 кэВ энергии.

Построены распределения плотности электронного пучка на поверхности водного фантома при прохождении через все типовые части формирования пучка. Более равномерное распределение обеспечивают рассеивающие фольги из 4-х слоев Al.

Рассчитано глубинное распределение дозы электронного пучка в водном фантоме, с учетом прохождения всех типовых частей формирования электронного ускорителя.

Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. В результате которых было выявлено, что номинальная энергия 6 МэВ заданная на ускорителе ONCOR соответствует рассчитанной энергии ускоренных электронов 6,3 МэВ.

В работе был использован ПИ для уменьшения времени расчета. Проведен расчет глубинной процентной дозы с использованием ПИ, а также выполнено сравнение глубинной процентной дозы с использованием ПИ и без его использования. Таким образом, расчеты с ПИ показали, что время расчета глубинной дозы можно сократить более чем в 10 раз.

Основной трудностью в работе было найти необходимую информацию об устройствах формирования пучка. Так как изготовителями

эта информация не распространяется. А именно: материал и толщина рассеивающих фольг, размеры первичного и вторичного коллиматоров, размеры и положение аппликаторов, геометрию ионизированных камер и т.д.

Список используемых источников

1. Милойчикова, Ирина Алексеевна. Формирование дозных полей индивидуальной конфигурации клинических пучков электронов с помощью полимерных изделий, изготовленных посредством технологий трехмерной печати: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 2018 / Милойчикова Ирина Алексеевна; [Место защиты: Нац. исслед. Том. политехн. ун-т]. – Томск 2018. – 155 с.;
2. Электронная терапия: [Электронный ресурс]. М., 2007-2018. URL: <http://www.medical-enc.ru/26/electron-therapy.shtml>. (Дата обращения: 03.05.2019).
3. Клинико-дозиметрическое обеспечение гарантии качества лучевой терапии онкологических больных: [Электронный ресурс]. М., 2011-2016.
URL: http://dissland.com/catalog/kliniko_dozimetricheskoe_obespechenie_garantii_kachestva_luchevoy_terapii_onkologicheskikh_bolnih.html/. (Дата обращения: 06.05.2019).
4. Robotjazi M. Monte Carlo Simulation of Electron. Beams produced by LIAC Intraoperative. Radiatio Therapy Accelerator //J Biomed Physics, 2018. – P.43-52.
5. М.Ш. Вайнеберг Радиационная дозиметрия: электронные пучки с энергиями от 1 до 50 МэВ. /М.Ш. Вайнберг – Москва: Изд-во Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
6. Thwaites D. I., Tuohy J. B. Back to the future: the history and development of the clinical linear accelerator //Physics in Medicine & Biology. – 2006. – V. 51. – №. 13. – P. R343.
7. Hogstrom K. R., Almond P. R. Review of electron beam therapy physics //Physics in Medicine & Biology. – 2006. – M. 51. – №. 13. – P. R455.

8. Danial Seifi Makrani. Determination of primary electron beam parameters in a Siemens Primus Linac using Monte Carlo simulation// Journal of Paramedical Sciences (JPS). – 2015. – V. 6. – №. 1. – P. 75-79.
9. Беспалов В. И. Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц //Известия вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – №. 4. – С. 159-165.
10. Storm L., Israel H. I. Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z= 1 to Z= 100 //Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1970. – V. 7. – №. 6. – P. 565-681.
11. Характеристика метода: рентгеноскопия.: [Электронный ресурс]. М., 2007-2019. URL: <https://studfiles.net/preview/5362796/page:10/>. (Дата обращения: 03.05.2019).
12. Арутюнов Д.В. Стратегический менеджмент: Учебное пособие/ Д. В. Арутюнова – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 122 с.
13. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие/ Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. – М.: Энергия, 1980. – 175 с.
14. Кузьмина Е.А. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю/ Кузьмин А.М. – « Методы менеджмента качества» №7 2002г.
15. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
16. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 №181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07.
17. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ Опасные и вредные факторы. Классификация [Текст]. – Взамен ГОСТ 12.0.002-74; введ. 1976-01-01. – М.: ИПК: Изд-во стандартов, 2002.
18. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988.

19. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999.