

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

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

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка компьютерной модели формирования терапевтического электронного пучка медицинского линейного ускорителя на энергию 12 МэВ

УДК 621.384.64:615.849

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6А	Ерунцов Вячеслав Владимирович		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2020 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)

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

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Профессиональные компетенции	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
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.

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

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

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

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А6А	Ерунцов Вячеслав Владимирович

Тема работы:

Разработка компьютерной модели формирования терапевтического электронного пучка медицинского линейного ускорителя на энергию 12 МэВ.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 28.02.2020 № 59-91/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1) Программа PCLab «Компьютерная лаборатория»; 2) Доклад «Радиационная дозиметрия: Электронные пучки с энергиями от 1 до 50 МэВ».
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	Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
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	01.03.2020
---	------------

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
0А6А	Ерунцов Вячеслав Владимирович		

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки – 14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

Период выполнения (весенний семестр 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.20	Составление и утверждение технического задания	5
05.03.20	Подбор и изучение материалов по теме	10
16.03.20	Проведение моделирования	50
07.05.20	Анализ и описание результатов	30
20.05.20	Подготовка к защите ВКР	5

Составил руководитель:

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.		

**«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А6А	Ерунцов Вячеслав Владимирович

Школа	ИЯТШ	Отделение Школа	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 – 1055 руб. – Заработная плата – 114088 руб. – Отчисления во внебюджетные фонды – 34226 руб. – Накладные расходы – 30186 руб. – Бюджет затрат НИИ – 181117 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	– Амортизационные отчисления – 1561 руб.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности ИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6А	Ерунцов В.В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А6А	Ерунцов Вячеславу Владимировичу

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

Тема ВКР:

Разработка компьютерной модели формирования терапевтического электронного пучка медицинского линейного ускорителя на энергию 12 МэВ

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Модель формирования терапевтического электронного пучка медицинского линейного ускорителя. Область применения – медицина, образование.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Правовые нормы трудового законодательства; – Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ и ускорителей; – СанПиН 2.2.2/2.4.2732–10 "Изменения № 3 к СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы"; – СанПиН 2.6.1.2573-10. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. Санитарные правила и нормативы.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – отклонение показателей микроклимата; – превышение уровня шума; – отсутствие или недостаток естественного освещения; – электромагнитное излучение; – психофизиологические факторы; – повышенный уровень ионизирующего излучения; – повышенное значение напряжения в электрической цепи.
3. Экологическая безопасность:	– анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду; – организационные и технические мероприятия по защите окружающей среды.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– выбор и описание типичной ЧС – пожар в рабочем помещении; – обоснование мероприятий по предотвращению ЧС; – порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.05.2020
---	-------------------

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6А	Ерунцов Вячеслав Владимирович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 97 страниц, 32 рисунка, 23 таблицы, 30 источников и 1 приложение.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, медицинский линейный ускоритель, лучевая терапия, PCLab, система формирования пучка, моделирование.

Объектом исследования являются характеристики электронного пучка, падающего на водный фантом.

Цель работы – рассчитать методом Монте-Карло характеристики электронного пучка медицинского линейного ускорителя, проходящего типовую систему формирования пучка.

В ходе работы был составлен файл данных для программы PCLab с помощью которого провели моделирование прохождения электронного пучка через систему формирования. На основе полученных результатов был проведен анализ влияния каждого элемента системы формирования на спектр электронов, падающих на фантом, рассчитано трехмерное распределение дозы электронного пучка в водном фантоме после прохождения электронами всей системы формирования. Рассчитанное распределение глубинной дозы сравнили с экспериментальным распределением для ускорителя SIEMENS ONCOR, в ходе которого выяснили что номинальной энергии 12 МэВ соответствует начальная энергия электронов 12,4 МэВ. В дополнение к этому, был сделан расчет с предварительно рассчитанным плоским источником с целью уменьшения времени расчета.

В результате работы для программы PCLab составлена модель типовой схемы системы формирования электронного терапевтического пучка линейного медицинского ускорителя которую можно использовать для исследований в области лучевой терапии.

Область применения: ядерная медицина.

Значимость работы: высокая.

Обозначения и сокращения

МэВ – мегаэлектронвольт;

ИИ – ионизирующее излучение;

ЛПЭ – линейная передача энергии;

ПГД – процентная глубинная доза;

РИП – расстояние от источника до поверхности;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ОЯТЦ – отделение ядерно-топливного цикла;

ИЯТШ – инженерная школа ядерных технологий;

ТПУ – Томский политехнический университет;

КЛ – компьютерная лаборатория;

PCLab – Personal Computer Lab;

EPHCA – electron photon cascade;

Lowess – locally weighted scatterplot smoothing;

ПИ – плоский источник;

НИР – научно-исследовательская работа;

ВКР – выпускная квалификационная работа;

SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

РУ УЭЛ – радиационная установка с ускорителем электронов;

РМУ УЭЛ – радиационная медицинская установка с ускорителем электронов;

ПДК – предельно допустимая концентрация;

ЭМП – электромагнитное поле;

Оглавление

Введение	15
1. Обзор литературы по теме	18
1.1. Дистанционная лучевая терапия	18
1.1.1. Электронные пучки в лучевой терапии	19
1.1.2. Центральное-осевое процентное глубинное распределение поглощенной дозы.....	21
1.1.3. Процентное глубинное распределение поглощенной дозы в зависимости от энергии электронного пучка	23
1.1.4. Процентное глубинное распределение поглощенной дозы в зависимости от площади облучаемой поверхности и РИП	25
1.2. Медицинские линейные ускорители электронов.....	27
2. Расчет характеристик электронного пучка медицинского линейного ускорителя	29
2.1. Система формирования пучка.....	29
2.2. Метод Монте-Карло	34
2.3. Программа «PCLab»	36
2.3.1. Режим «PHANTOM»	36
2.3.2. Параметры файла данных для геометрии и источника	37
3. Результаты моделирования	44
3.1. Влияние элементов системы формирования пучка на спектр электронов	44
3.2. Распределение плотности электронов	52
3.3. Распределение процентной глубинной дозы в водном фантоме	54

3.4. Расчет распределения ПГД с использованием плоского источника.....	56
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	59
4.1. Введение для раздела	59
4.2. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	59
4.2.1. Анализ конкурентных технических решений	59
4.2.2. SWOT-анализ	60
4.3. Планирование научно-исследовательских работ.....	61
4.3.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	61
4.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	62
4.3.3. Бюджет научно-технического исследования	64
4.3.3.1. Расчет материальных затрат научно-технического исследования	65
4.3.3.2. Расчет амортизации специального оборудования	65
4.3.3.3. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	66
4.3.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	68
4.3.3.5. Накладные расходы	68
4.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .	68
4.5. Выводы по разделу	71

5. Социальная ответственность	73
5.1. Введение для раздела	73
5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	73
5.2.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.....	73
5.2.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны инженера.....	76
5.3. Профессиональная социальная безопасность	77
5.3.1. Анализ вредных и опасных факторов, возникающих при эксплуатации разработанной модели. Обоснование мероприятий по защите инженера от их действия.....	78
5.3.2. Анализ вредных и опасных факторов, возникающих при работе исследователя. Обоснование мероприятий по защите инженера от их действия	82
5.4. Экологическая безопасность.....	85
5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	86
5.5.1. Анализ типичной ЧС при проведении исследования	86
5.5.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и порядок действий в случае возникновения ЧС	87
5.6. Выводы по разделу	88
Заключение	89
Список использованных источников	91
Приложение А	95

Введение

За все время существования людей, их всегда сопровождают различные болезни. От одних можно излечиться самому, от других человеку требуется медицинская помощь. Заболевания, связанные со злокачественными опухолями, человеку излечить собственными силами практически невозможно. Без оперативной медицинской помощи такие опухоли начинают очень быстро прогрессировать и приводить к летальному исходу. Успех при лечении онкобольного зависит от множества факторов. Одним из них является выбор методов лечения и их комбинация. В онкологии существует три варианта лечения: хирургическим путем, лекарственным (химиотерапия) и лучевая терапия.

Начало лучевой терапии было положено в 1895 г. Вильгельмом Конрадом Рентгеном. Именно тогда было совершено великое открытие – X-лучи. Уже спустя год после открытия были проведены первые работы в сфере дистанционной лучевой терапии – облучены поверхностные новообразования. Главной проблемой рентгеновских лучей является их большое боковое рассеяние в тканях. Особенно остро эта проблема ощущается при лечении глубоко расположенных опухолей. Это связано с тем, что максимальное значение дозы для рентгеновских лучей достигается на коже, у поверхности. Наибольшего успеха в решении данной проблемы добился Гарольд Джонс в 1951 г. Для дистанционной лучевой терапии он предложил использовать ^{60}Co . Спустя всего шесть лет в Стенфордском госпитале к работе приступает первый медицинский линейный ускоритель электронов. Лучевая терапия, как метод лечения онкологических заболеваний получила широкое распространение по всему миру. Около 70 % больных в развитых странах могут беспрепятственно получить медицинскую помощь. По сравнению с хирургическим и лекарственным, лучевая терапия является неинвазивным и более дешевым методом [1].

Линейные медицинские ускорители стали наиболее широко используемым источником электронного и тормозного излучения в современной

лучевой терапии [2]. При электронной лучевой терапии к опухоли доставляется определенная поглощенная доза путем облучения ее равномерным электронным пучком. Для того, чтобы доставить определенную величину дозы и сформировать равномерный пучок электронов, в линейном ускорителе используется система формирования пучка. Она представляет собой набор различных элементов – рассеивающие фольги, коллиматоры, ионизационную камеру и аппликатор. Каждый из этих элементов имеет определенные параметры, которые влияют на формируемое распределение пучка: геометрические размеры и форма, расстояние от источника, материал из которого он состоит. Для электронов разных энергий эти параметры будут отличаться [2].

Найти подробную информацию по параметрам системы формирования электронного пучка какого-либо ускорителя в открытом доступе практически невозможно – эта информация является коммерческой тайной. Даже величина энергии пучка указывается как «номинальная», неизвестно на каком именно этапе она равна указываемой величине. В профессиональной литературе можно лишь частично найти некоторые параметры и общую схему геометрии системы формирования электронного пучка. В каждом источнике приводятся свои значения для параметров системы, поэтому для проведения исследований в этой области необходимо провести работу с большим количеством информации, часть которой доступна лишь на английском языке.

На основе литературных данных можно определить приблизительные параметры системы формирования пучка. Для того чтобы проверить, действительно ли система с такими параметрами будет соответствовать экспериментальной, можно создать компьютерную модель такой системы и произвести ее расчет, сравнив результаты с экспериментальными. Именно это и осуществлено в данной работе.

Цель работы – на основе статистического моделирования рассчитать характеристики электронного пучка, падающего на водный фантом после прохождения всех типовых элементов формирования пучка, рассчитать

процентную глубинную дозу в водном фантоме, из сравнения расчетных и экспериментальных распределений определить необходимые начальные характеристики пучка.

Чтобы достичь поставленную цель, были определены следующие задачи:

1. Ознакомиться с современным состоянием электронной лучевой терапии: где используются электронные пучки, их преимущества и недостатки.

2. Определить устройства, необходимые для мониторинга пучка и для формирования равномерного пространственного распределения пучка на поверхности фантома.

3. Научиться составлять файл данных для расчетов глубинного распределения дозы электронного пучка в программе PCLab в режиме PHANTOM с учетом различных элементов формирования терапевтического электронного пучка.

4. Изучить влияние различных устройств формирования терапевтического электронного пучка на изменение спектра электронов.

5. Рассчитать глубинное распределение дозы электронного пучка в водном фантоме после прохождения через все типовые части электронного ускорителя, формирующие терапевтический пучок.

6. Сравнить расчетные и экспериментальные данные и провести корректировку численной модели в соответствии с реальными данными клинической дозиметрии в водном фантоме для электронного пучка на энергию 12 МэВ.

1. Обзор литературы по теме

1.1. Дистанционная лучевая терапия

Главный инструмент лучевой терапии – это ионизирующее излучение. Основной задачей лучевой терапии является нанесение вреда с последующим прекращением жизнедеятельности клеткам злокачественных опухолей посредством возникающих на пути заряженных частиц и фотонов актов ионизации. Оценивают воздействие ИИ на цель облучения с помощью поглощенной дозы [1].

Поглощенная доза – отношение средней энергии, которую излучение передало некоторому объему вещества, к массе вещества в этом объеме. Единицы измерения – $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ [3].

Для прекращения жизнедеятельности клетки, с энергетической точки зрения нужна небольшая величина поглощенной дозы. Как правило, за весь курс лечения (1 – 1,5 месяца, при значительном уменьшении или исчезновении опухоли к концу курса) подведенная поглощенная доза составляет 60 – 70 Гр [1].

Онколог-радиолог при планировании лечения онкобольного сталкивается с трудной задачей назначения схемы лечения с дозой облучения, которая потенциально поможет излечению и контролю опухоли, но не вызовет серьезных осложнений для здоровой ткани. Трудность заключается в сильной зависимости реакции как опухоли, так и здоровой ткани от дозы облучения, небольшое изменение доставляемой дозы ($\pm 5 \%$) может привести к резкому изменению реакции облученной ткани на процесс лечения. Часто, предписанные лечебные дозы очень близки к дозам, переносимым нормальными тканями. Таким образом, для оптимального лечения доза облучения должна планироваться и доставляться с высокой степенью точности [4].

Качественно методы лучевой терапии разделяются на два вида – по используемому ИИ. Выделяют редкоионизирующее и плотноионизирующее излучение. Основным различием этих видов излучения заключается в ЛПЭ – линейной передаче энергии. Линейная передача энергии выражает величину передаваемой ИИ энергии веществу, через которое ИИ проходит, на единицу

длины пути. На одинаковых по длине траекториях в веществе разные виды излучения совершают разное количество актов ионизации, а значит передают разную величину энергии. Единицы измерения ЛПЭ – кэВ/мкм. Для редкоионизирующих излучений ЛПЭ составляет менее 10 кэВ/мкм (например рентгеновское, гамма-излучение, электроны), они создают несколько актов передачи энергии на 1 мкм трека. Для плотноионизирующих излучений ЛПЭ достигает 50–150 кэВ/мкм (например альфа-частицы, протоны небольших энергий, нейтроны за счет ядер отдачи, тяжелые ионы). Высокое значение ЛПЭ означает, что в опухоли рассеется большое количество энергии, что в свою очередь приведет к образованию значительного количества свободных радикалов и перекисей, которые приведут к гибели клетки, даже если она обладает высокой радиорезистентностью [1].

1.1.1. Электронные пучки в лучевой терапии

Электронные пучки нашли широкое применение в современной лучевой терапии. Несмотря на то, что их использование было доступно в течении многих лет, только в 1970-х годах, с началом распространения линейных ускорителей электронов, электронные пучки начали играть важную роль в лучевой терапии. Несколько ключевых разработок и технических решений в 1970-х годах позволили повысить эффективность лечения электронным пучком. К ним относятся: сканер компьютерного томографа, который положил начало планированию лечения на основе компьютерной томографии, усовершенствование планирования электронной терапии, посредством повышения точности расчета и отображения получаемой пациентом дозы с использованием данных компьютерной томографии, а также модификация конструкции линейного ускорителя, улучшающая глубинное распределение дозы, боковое рассеяние и другие характеристики электронного пучка. Важными деталями совершенствования технологии стало разработка системы формирования пучка с двумя рассеивающими фольгами, а также улучшение аппликаторов [4].

Можно легко рассчитать распределение дозы от пучков излучения фотонов, электронов и т.д., если осуществлять облучение фантома, состоящего из одного вещества, плотность которого одинакова по всему объему. Облучаемая сторона при этом должна быть перпендикулярна вектору облучения, а весь фантом иметь простую геометрическую форму, например, куб. Тем не менее, у настоящего пациента все по-другому – приходится учитывать сложную форму ткани, ее различные плотность и атомный состав [4].

Как правило, полученные для идеальной геометрии дозы умножаются на различные поправочные коэффициенты для получения близкого к реальному распределения дозы внутри тела пациента. Не стоит преуменьшать необходимость проверки используемого для лечения распределения дозы. Задача клинического физика состоит в проведении необходимых расчетов и учете всех нюансов, связанных с лечением пациента для предотвращения ошибок, которые могут привести к нежелательному исходу [4].

Проходя через вещество электроны теряют свою энергию со временем рассеиваясь на определенной глубине. Взаимодействия электронов могут быть упругими, когда кинетическая энергия электронов не теряется при столкновении, либо неупругими, когда некоторая часть их кинетической энергии переходит электронам и ядрам атомов вещества. В результате упругого рассеяния электрон меняет свою траекторию движения без потери энергии. При неупругом взаимодействии электроны пучка могут выбить электроны из атомов облучаемого вещества. Те в свою очередь, если обладают достаточной кинетической энергией также могут вызвать ионизацию. Такие электроны называются вторичными [4].

При облучении электронным пучком также образуется тормозное и характеристическое излучение. Тормозное излучение образуется в результате взаимодействия падающих на вещество электронов и кулоновского поля электронов атомов вещества. В кулоновском поле атомов электроны рассеиваясь движутся с ускорением и излучают электромагнитное (тормозное) излучение. При неупругих столкновениях электронов пучка и электронов атомов вещества,

на место выбитых электронов (вакансии) переходят электроны с более высоких орбит, часть энергии связи при этом выделяется в виде характеристического излучения [4].

Доза от образующегося тормозного излучения может варьироваться от 1 до 5 % для электронных пучков с энергией 6 и 20 МэВ соответственно. Скорость потери энергии электронами на единице пути выше для материалов с низким порядковым номером периодической таблицы (с низким Z), чем для материалов с высоким Z . Это объясняется тем, что чем выше порядковый номер Z вещества, тем меньше электронов приходится на один грамм такого вещества, по сравнению с материалами с низким Z . От энергии электрона зависит процесс его рассеяния. Низкоэнергетические электроны (до 10 МэВ) обладают большим боковым рассеянием и поэтому при работе с такими пучками нужно учитывать, что облучению могут подвергаться здоровые ткани, находящиеся у границ сформированного профиля пучка. У высокоэнергетических электронных пучков боковое рассеяние меньше, в большей степени они рассеиваются в заданном направлении пучка [4].

При прохождении сквозь ткань полуширина энергетического спектра электронного пучка увеличивается, в то время как средняя энергия спектра уменьшается с увеличением пройденной толщины ткани. Скорость уменьшения энергии, например, в мышцах составляет 2 МэВ/см [4].

1.1.2. Центральное-осевое процентное глубинное распределение поглощенной дозы

Для правильной оценки дозового распределения по глубине равномерного электронного пучка используют процентное глубинное распределение дозы. Оно позволяет оценить, на какой глубине поглощенная доза пучка достигает максимума, сколько процентов от нее составляет поверхностная доза, а также оценить практический и терапевтический диапазон. Правильная оценка практического диапазона позволит минимизировать вред для здоровых тканей, а терапевтического диапазона – повысить эффективность лечения [4].

Форма кривой процентной глубинной дозы от электронного пучка зависит от многих факторов. В первую очередь от энергии пучка, площади облучаемой поверхности, расстояния источник – пациент, коллимации, глубины проникновения и угла падения пучка. Типичная кривая процентной глубинной дозы для электронов представлена на рис. 1 [4].

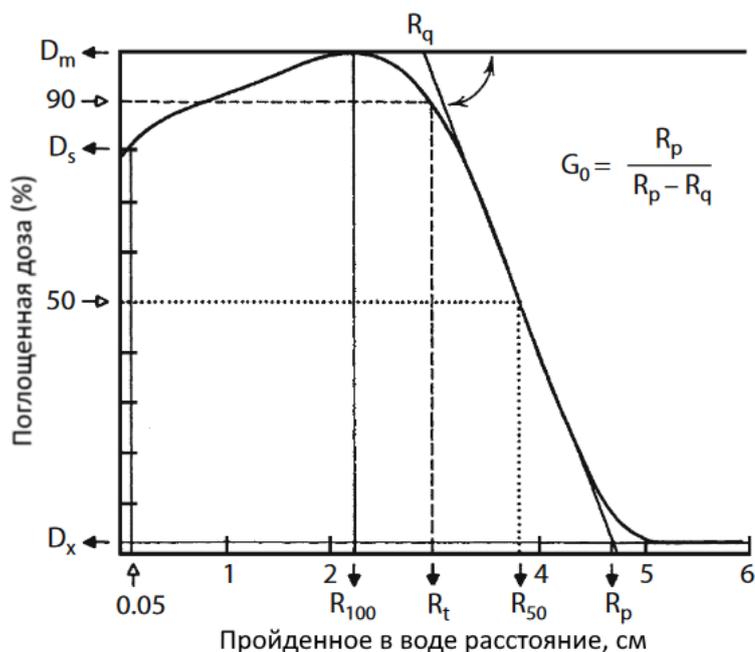


Рисунок 1 – Центально-осевое глубинное распределение поглощенной дозы электронов в водном фантоме

На рис. 1 также приведены некоторые величины, которые используются для качественной оценки сформированного распределения электронного пучка. D_s – поверхностная процентная поглощенная доза, измеряемая на расстоянии от поверхности, равном 0,05 см. D_m – максимальная процентная поглощенная доза в водном фантоме, D_x – процентная поглощенная доза от образующегося рентгеновского излучения. R_{100} – расстояние на котором достигается максимальная процентная поглощенная доза в водном фантоме. R_t – расстояние соответствующее дозе 90 % от максимальной, терапевтический диапазон т.е. полезный профиль излучения. R_{50} – глубина при которой процентная поглощенная доза в два раза меньше от максимальной. R_p – практический диапазон, определяемый посредством пересечения горизонтальной линии, проведенной от процентная дозы D_x (фона, вклад в который определяет

рентгеновское излучение), и линии экстраполяции убывающей части кривой процентной глубинной дозы. По величине, в сантиметрах, близок начальной энергии пучка, деленной на 2. Так, например, электронный пучок с энергией 12 МэВ имеет практический диапазон приблизительно 6 см. G_0 – градиент уменьшения дозы. Эта мера того, как быстро уменьшается доза за пределами терапевтического диапазона. Данный коэффициент зависит от величины R_q , которая представляет собой расстояние в водном фантоме, определяемое перпендикуляром к оси X от точки пересечения касательной к убывающей части кривой ПГД и горизонтальной линии, проходящей через ось Y при значении, равном максимальной дозе [4].

Часть кривой ПГД на расстоянии, превышающем практический диапазон показывает вклад в дозу от тормозного излучения. Учет вклада рентгеновского излучения в дозу важен, поскольку это излучение, помимо опухоли, воздействует и на здоровые ткани, находящиеся за опухолью. Разрабатываемые методы по облучению должны как можно сильнее уменьшать вклад от тормозного излучения, в идеале не должен превышать 1 % [4].

1.1.3. Процентное глубинное распределение поглощенной дозы в зависимости от энергии электронного пучка

Процентная глубинная доза на поверхности увеличивается пропорционально увеличению энергии пучка. Так для электронного пучка с энергией 6 МэВ, ПГД у поверхности составляет 70 – 75 %, для 20 МэВ значение поверхностной ПГД составляет примерно 95 %. На рис. 2 показаны кривые ПГД в воде для электронных пучков с энергиями 6, 9, 13, 17 и 20 МэВ [4].

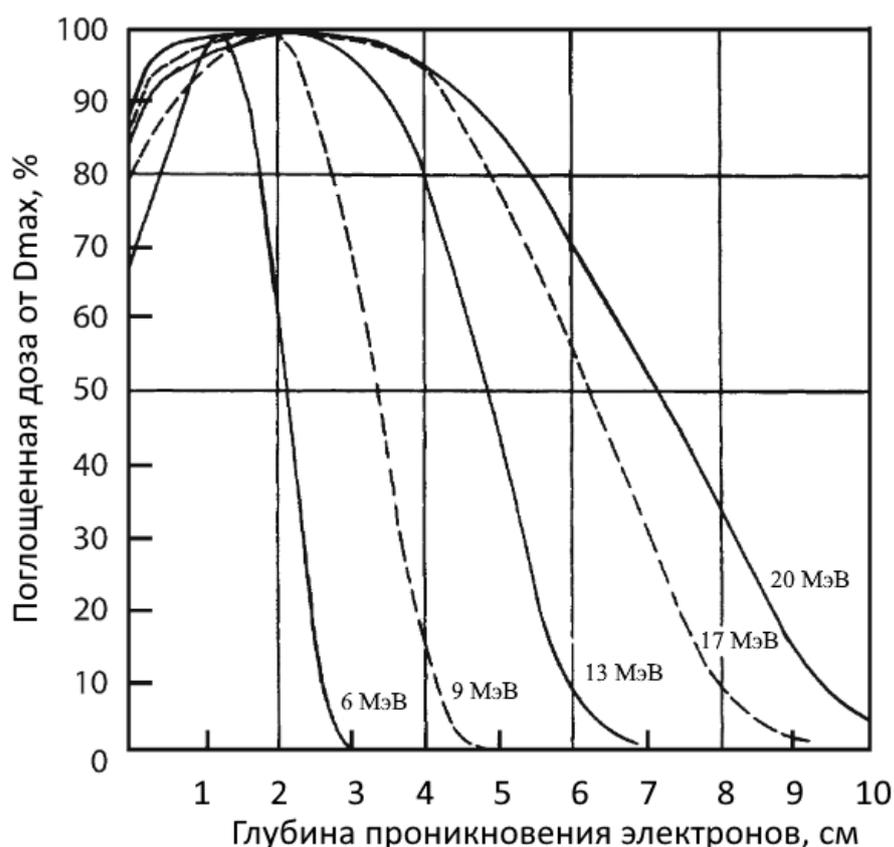


Рисунок 2 – Центральное-осевое процентное глубинное распределение дозы для электронных пучков с энергией от 6 до 20 МэВ

Как видно из рис. 2, чем ниже энергия электрона, тем меньше поверхностная доза и наоборот, электроны с высокой энергией создают высокую поверхностную дозу. Это связано с тем, что электроны с малой энергией рассеиваются на большие углы, чем электроны с более высокой энергией. Контроль поверхностной дозы очень важен, небольшое превышение дозы может спровоцировать неблагоприятные последствия для кожи, которая находится на пути у электронов до опухоли. Стоит отметить, что электронные пучки с низкими значениями энергий имеют более узкий терапевтический диапазон дозы, чем пучки с высокими значениями энергий. При планировании лечения электронными пучками высоких энергий необходимо внимательно следить за тем, чтобы здоровые ткани, находящиеся за опухолью, не попали под облучение [4].

1.1.4. Процентное глубинное распределение поглощенной дозы в зависимости от площади облучаемой поверхности и РИП

Чаще всего облучающий профиль пучка по форме представляет собой квадрат. Заданный размер и форма должна достигаться в изоцентре, вокруг которого вращается головка (гантри) ускорителя. Чем меньше размер поля, тем больший вклад в поглощенную дозу вносит первичное излучение. В таких случаях обычно вклад рассеянного излучения пренебрежимо мал и его принимают равным нулю. Но с увеличением размера поля вклад рассеянного излучения в поглощенную дозу увеличивается, т.к. увеличивается объем вещества, в котором может рассеиваться излучение. На рис. 3 приведена кривая процентной глубинной дозы для разных размеров облучаемой поверхности для низкоэнергетического (а) и высоко энергетического (б) пучка электронов. Под низкоэнергетическим электронным пучком в лучевой терапии подразумевают электроны с энергией меньше 20 МэВ [5].

С увеличением глубины вклад рассеянного излучения в поглощенную дозу увеличивается. Как упоминалось ранее, чем меньше энергия электронов, тем под большим углом они рассеиваются. Поскольку вероятность рассеяния или сечение рассеяния уменьшается с увеличением энергии, электроны с более высокой энергией рассеиваются в большей степени в направлении своего движения. Изменение размера площади облучаемой поверхности для высокоэнергетического пучка практически не влияет на поверхностную ПГД и основное влияние оказывает на глубинах, больше R_{100} . Зависимость поверхностной ПГД для низкоэнергетических электронов от размера поля более выражена, чем для высокоэнергетических. В большинстве случаев при лечении требуются поля облучения разных размеров и формы. Существуют приравнивающие коэффициенты, которые позволяют преобразовать параметры квадратного поля заданного размера в необходимые для лечения в каждом конкретном случае [5].

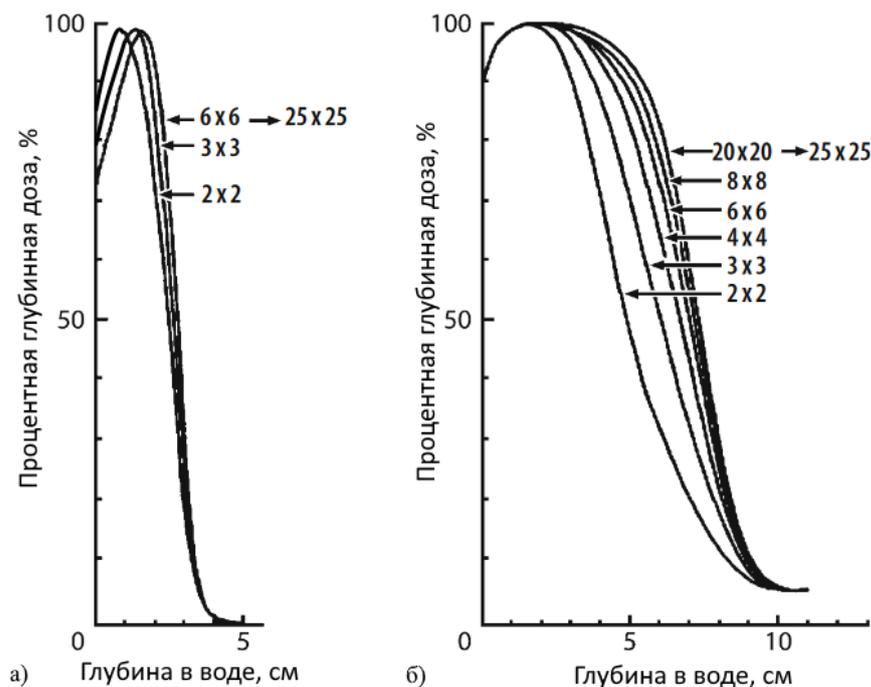


Рисунок 3 – Кривая процентной глубинной дозы при разных площадях облучаемой поверхности. Низкоэнергетические электроны – а, высокоэнергетические – б

Плотность потока фотонов и электронов, испускаемых точечным источником излучения, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Хотя источник в линейном медицинском ускорителе имеет конечные размеры (диаметр пучка), расстояние от источника до поверхности (РИП) обычно выбирается настолько большим (≥ 80 см), что источник можно принять за точечный. Как и плотность потока, точно также изменяется и мощность излучения [5].

Несмотря на то, что фактическая мощность поглощенной дозы в точке уменьшается с увеличением РИП, ПГД, как относительная величина по отношению к поглощенной дозе в контрольной точке, увеличивается с РИП. Для электронного пучка контрольная точка находится в точке, где достигается максимальная поглощенная доза. На рис. 4 приведена зависимость относительной поглощенной дозы от расстояния до источника. Контрольная точка находится на расстоянии 80 см от источника. Данный рисунок показывает, что чем дальше от источника рассматривается относительная поглощенная доза, тем меньше скорость ее убывания. На расстояниях близких к источнику разница

между относительной поглощенной дозой в двух разных точках гораздо больше. В лучевой терапии РИП является важным параметром.

Он определяет, какая мощность дозы должна достигаться на необходимом расстоянии, это в свою очередь влияет на кривую ПГД. Так как мощность дозы уменьшается с расстоянием, выбирается такая величина РИП, которая обеспечивает компромисс между мощностью дозы, которую нужно достичь, и ПГД. Минимально рекомендуемое РИП составляет 80 см, в эталонной дозиметрии клинических фотонных и электронных пучков при нормировании кривой ПГД стандартное РИП равно 100 см. Большие значения РИП используются в том случае, если требуется размеры полей больше чем те, что доступны с имеющимся значением этого параметра [5].

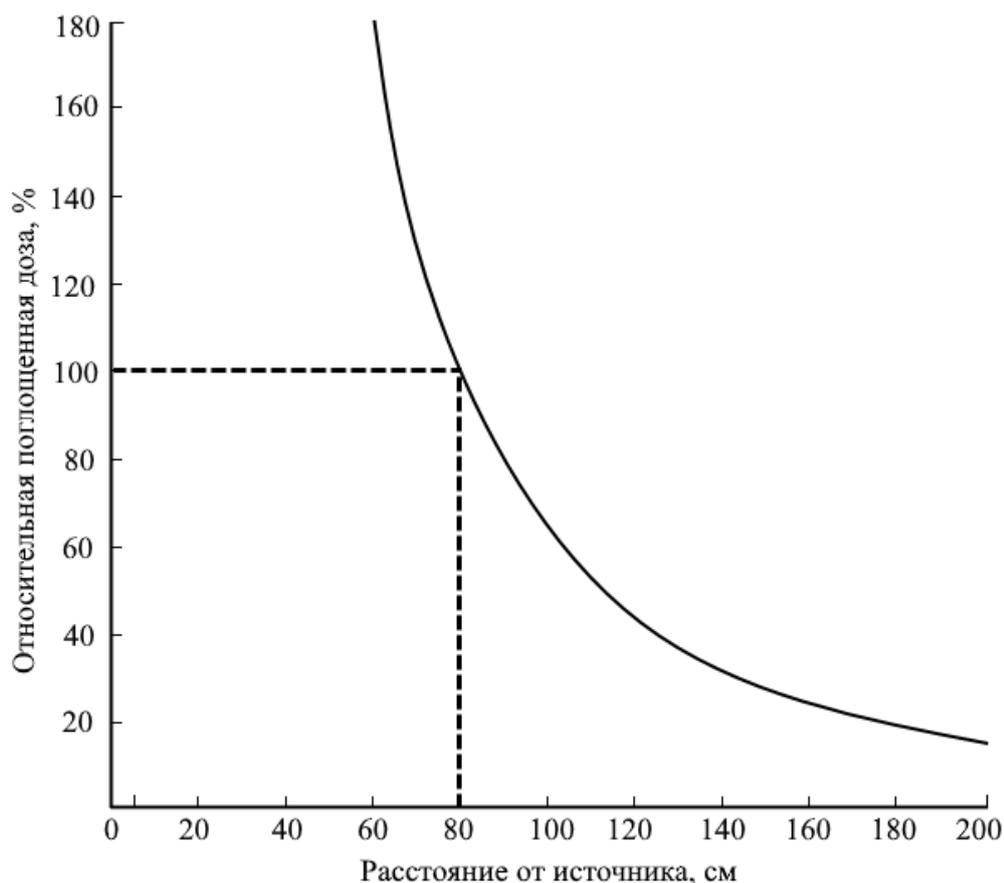


Рисунок 4 – Зависимость относительной поглощенной дозы в точке от расстояния до источника. Контрольная точка находится на расстоянии 80 см

1.2. Медицинские линейные ускорители электронов

Линейный ускоритель – это устройство, которое использует высокочастотные электромагнитные волны для ускорения заряженных частиц,

таких как электроны, до высоких энергий. Существует несколько типов линейных ускорителей, в лучевой терапии чаще всего используются те, что ускоряют электроны с помощью бегущих или стоячих электромагнитных волн с частотой в микроволновой области [6].

Современные линейные ускорители электронов способны генерировать пучки в энергетическом диапазоне 6 – 20 МэВ. Энергия клинического электронного пучка описывает наиболее вероятную энергию при стандартном лечении и расстоянии от источника до пациента [4]. На рис. 5 приведена схема и фотография линейного медицинского ускорителя.

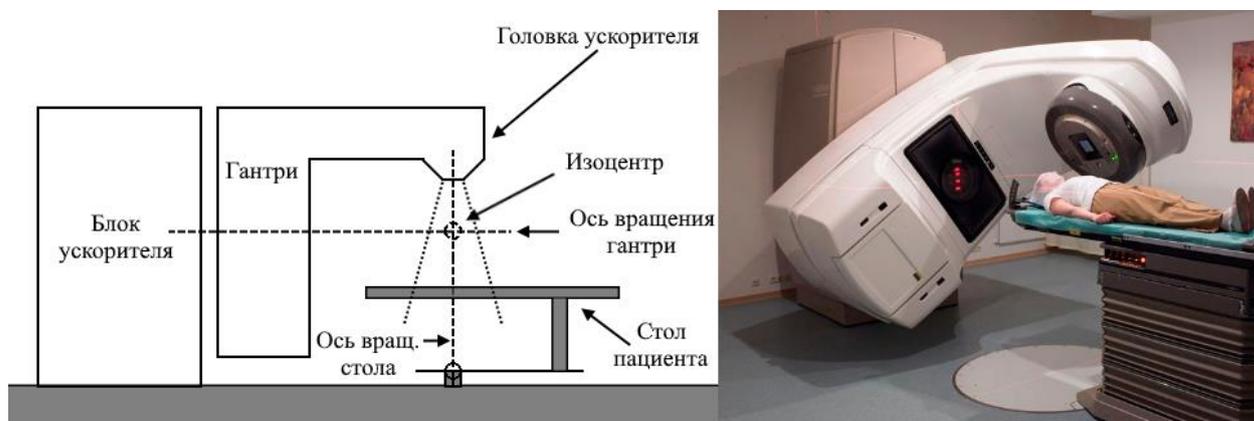


Рисунок 5 – Схема и фотография линейного медицинского ускорителя

Электронный пучок направляется с помощью системы транспортировки пучка через гантри до головки ускорителя. Изоцентр – точка в которой достигается поглощенная доза, по величине соответствующая терапевтическому диапазону. Гантри медицинского ускорителя может свободно вращаться в вертикальной плоскости, а стол пациента – в горизонтальной. Пациент располагается на столе в положении лежа, возможность вращения гантри и стола позволяют облучать опухоль в любом месте и под любым углом [4].

2. Расчет характеристик электронного пучка медицинского линейного ускорителя

2.1. Система формирования пучка

Как было написано в предыдущих главах, главным инструментом в лучевой терапии электронами является равномерный электронный пучок. Прежде чем распределение пучка станет пригодным для использования в лучевой терапии, необработанный «тонкий луч» электронов должен пройти через систему рассеивающих фольг и фильтров, коллиматоров, ионизационных камер и аппликатора. На рис. 6 приведена трехмерная геометрия модели системы формирования электронного пучка, которая рассчитывалась в режиме «PHANTOM» в программе «PCLab».

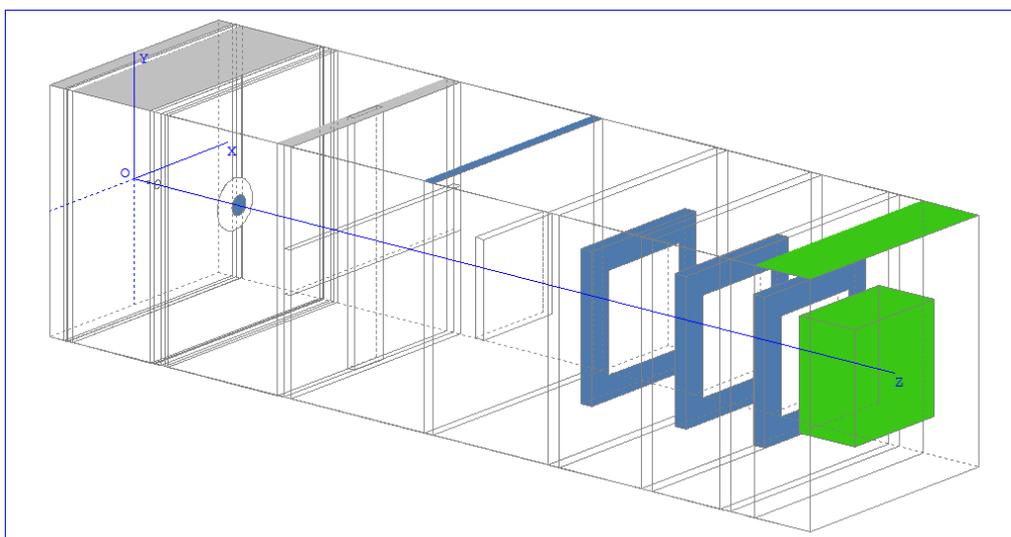


Рисунок 6 – Трехмерный вид системы формирования пучка. Модели, рассчитываемой в «PCLab»

На рис. 7 схематически указаны основные дозиметрически важные элементы системы формирования электронного пучка медицинского линейного ускорителя. Электронный пучок направлен вдоль оси OZ .

Система формирования пучка находится в головке ускорителя. Корпус головки ускорителя состоит из экранирующего материала с высокой плотностью (свинец, вольфрам или их сплав) для обеспечения достаточной защиты от утечки излучения согласно нормам радиационной безопасности [5].

Из вакуумной камеры ускорителя выходит тонкий электронный луч малого диаметра, который, проходя через титановое выходное окно попадает на первую рассеивающую фольгу [5].

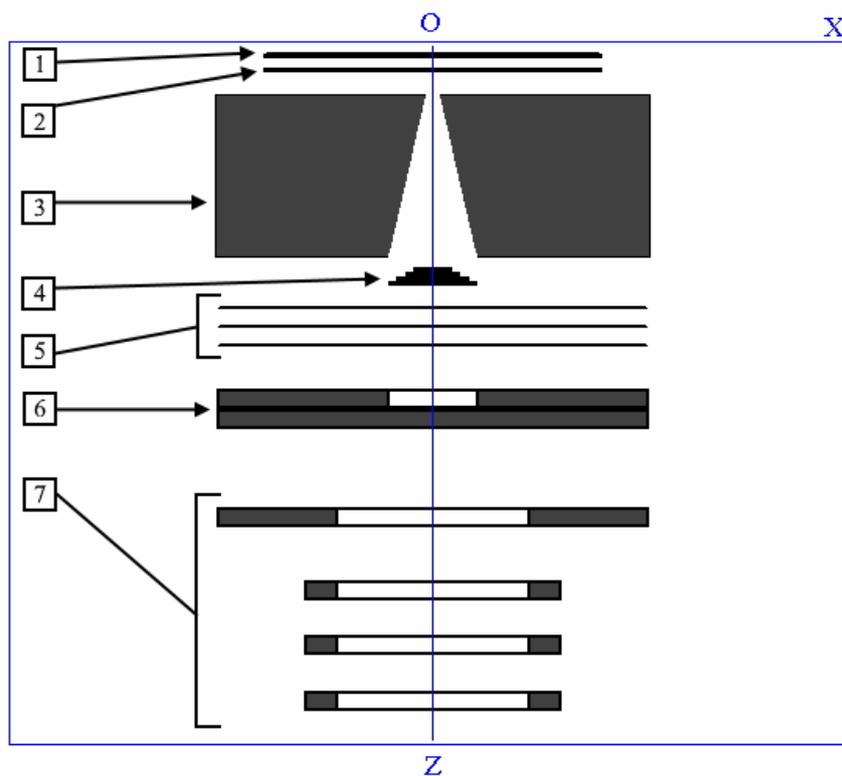


Рисунок 7 – Дозиметрически важные части типовой системы формирования электронного пучка медицинского линейного ускорителя электронов. 1 – стенка выходного окна вакуумной камеры ускорителя, 2 – первая рассеивающая фольга, 3 – первый неподвижный коллиматор, 4 – вторая рассеивающая фольга (рассеивающий фильтр), 5 – ионизационная камера, 6 – подвижный коллиматор, 7 – аппликатор (крепление аппликатора и 3 пластины-рамки)

Задача первой рассеивающей фольги рассеять пучок. Она представляет собой тонкий лист металла с высоким Z (свинец, тантал). Необходимо чтобы при прохождении через нее рассеивалось как можно больше электронов и образовывалось как можно меньше тормозного излучения. Именно поэтому фольга обладает достаточно малой толщиной, а для большего рассеяния используются металлы с высоким Z . Средний угол рассеяния заряженных частиц увеличивается с увеличением атомного номера вещества. Это следует из формулы 1:

$$\bar{\vartheta} \approx \alpha Z_2^{\frac{1}{3}} \frac{m_e \sqrt{1-\beta^2}}{m_1 \beta} \sqrt{4L_K - 1}, \quad (1)$$

где $\bar{\vartheta}$ – средний угол рассеяния налетающего электрона, $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ – постоянная тонкой структуры, Z_2 – величина заряда ядер атомов вещества, m_e – масса электрона, m_1 – масса налетающей заряженной частицы, β – скорость частицы в единицах скорости света в вакууме, $L_K = \ln[194(AZ_2)^{-1/6}]$ – кулоновский логарифм [7].

После прохождении первой рассеивающей фольги, тонкий луч имеет нормальное гауссовское распределение. Далее электронный пучок попадает на свинцовый коллиматор. Данный коллиматор «отсекает» от пучка излучение, рассеянное под большим углом относительно оси Z [5].

После свинцового коллиматора пучок попадает на рассеивающий фильтр. Задача данного фильтра – сформировать равномерное распределение электронного пучка (рис. 8). Используется тонкая фольга для уменьшения количества образующегося рентгеновского излучения. Фильтр имеет сложную форму с переменной толщиной, наибольшая толщина – в центре, постепенно снижается к краю рассеивающего фильтра [5].

Сформированный равномерный пучок электронов после рассеивающего фильтра попадает в ионизационную камеру. Функция ионизационной камеры состоит в контроле мощности дозы пучка. В модель она включена, т.к. является важным дозиметрическим элементом системы формирования пучка и оказывает, хоть и не большое, влияние на распределение электронного пучка. Кроме этого расчет ее показания позволяет перейти от нормировки на одну частицу источника к реальным условиям облучения. Система мониторинга в ускорителях может состоять из одной или нескольких ионизационных камер, в данной работе рассматривается вариант с одной камерой. Это ионизационная камера трансмиссионного типа, т.е. камера с несколькими плоскими параллельными пластинами, покрывающими всю область прохождения пучка [8]. Две рабочие области данной камеры, заполненные воздухом, ограничены двумя

высоковольтными электродами и разделены центральным собирающим электродом. На электроды подается напряжение в диапазоне от 300 до 1000 В, в зависимости от конструкции камеры, собирающий электрон подключается к измерительной системе [9]. Электроды расположены перпендикулярно направлению распространения пучка и выполнены из алюминия, толщина каждого электрода составляет 5 мкм. Обычно такие ионизационные камеры герметизированы, чтобы температура и давление наружного воздуха не влияла на измеряемую мощность дозы. В некоторых линейных ускорителях, например фирмы Elekta, такие камеры имеют автоматическую систему компенсации давления и температуры. В любом случае данные камеры должны периодически проверяться на независимость измеряемых параметров от внешних факторов [5].

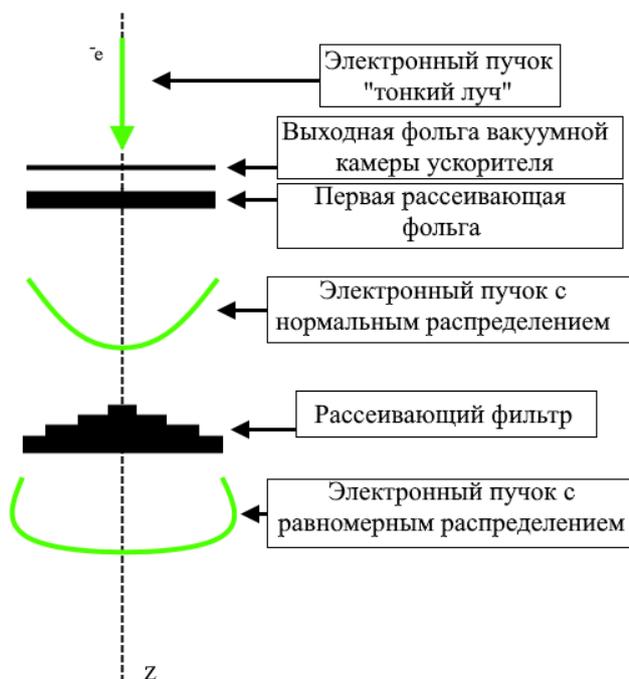


Рисунок 8 – Формирование равномерного электронного пучка с помощью первой рассеивающей фольги и рассеивающего фильтра

После прохождения через ионизационную камеру электронный пучок падает на подвижный коллиматор. Данный коллиматор состоит из двух пар свинцовых или вольфрамовых блоков и формирует прямоугольное отверстие от $0 \times 0 \text{ см}^2$ до максимального возможного размера (обычно $40 \times 40 \text{ см}^2$, либо меньше). Он коллимирует электронный пучок и поглощает тормозное

излучение, которое образуется при прохождении электронов через предыдущие элементы системы формирования пучка. На рис. 9 показано как блоки перемещаются относительно оси направления пучка (ось Z) [4].

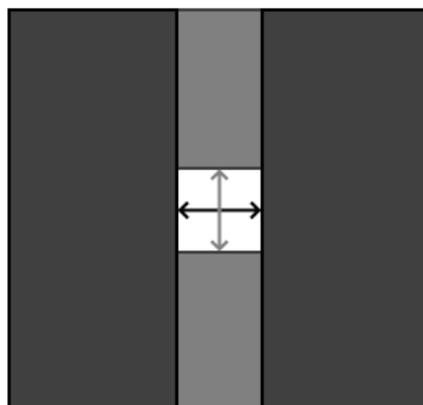


Рисунок 9 – Схема перемещения блоков относительно центральной оси

Для формирования необходимой площади профиля электронного пучка подвижного коллиматора недостаточно. Электроны легко рассеиваются в воздухе, поэтому на оставшемся расстоянии от подвижного коллиматора до поверхности кожи пациента необходима дополнительная коллимация [5]. Эту функцию выполняет аппликатор. В модели он представляет собой крепление аппликатора и 3 пластины-рамки. На рис. 10 показана его схема.

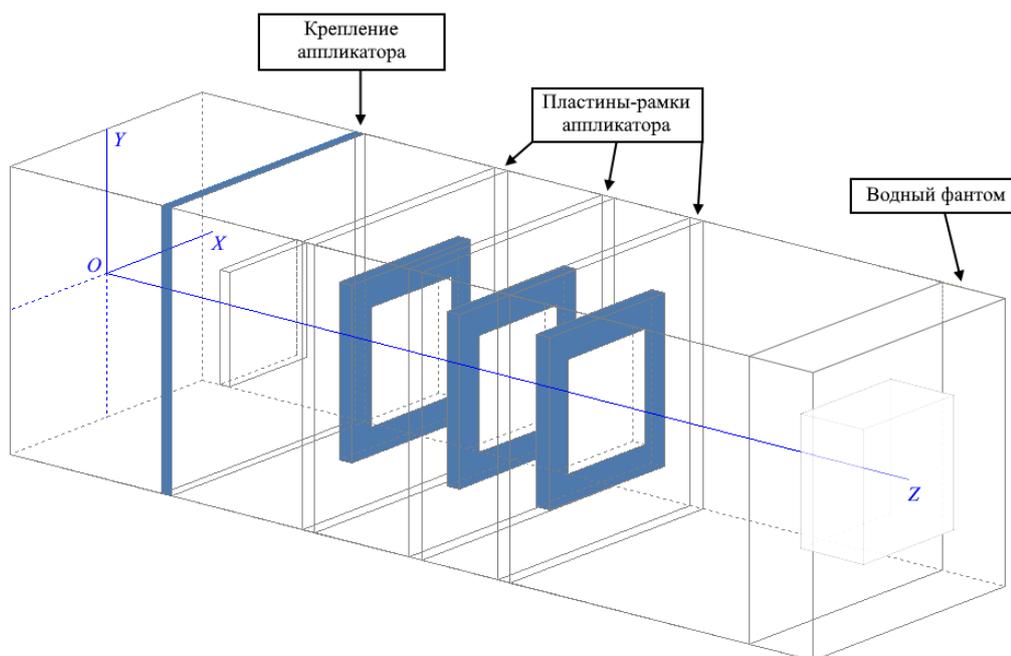


Рисунок 10 – Трехмерная схема аппликатора

2.2. Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло представляет собой метод решения задач путем случайного воспроизведения работы отдельных компонентов задачи. Расчет данным методом основан на имитации какого-либо процесса, выполнении случайным образом каких-либо операций большое число раз до достижения определенного результата. Значительно ускорить выполнение вычисления с помощью рассматриваемого метода помогли ЭВМ – они идеально подходят для выполнения таких операций [10].

В качестве простого примера использования метода Монте-Карло можно рассмотреть следующую задачу (рис. 11).

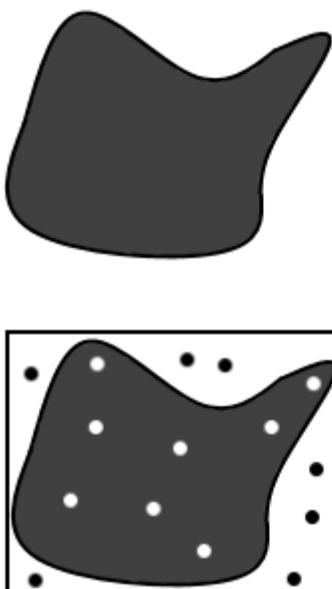


Рисунок 11 – Пример использования метода Монте-Карло – расчет площади фигуры сложной геометрической формы

Необходимо определить площадь сложной фигуры внутри прямоугольника, площадь которого заранее известно. Определение будет осуществляться путем расставления в случайном месте на прямоугольнике точек с единичной площадью. При появлении точки, определяется, попала ли она в площадь сложной фигуры или нет. В случае попадания, она идет в учет площади сложной фигуры, не попавшие – не засчитываются. Путем повторения таких действий, при определенном количестве расставлений будет возможно определить площадь сложной фигуры. Стоит учитывать, что чем больше было

проведено расставлений, тем больше точность получаемого результата. Но осуществление большего числа расставлений займет больше времени [10].

Метод Монте-Карло нашел широкое применение в социальных науках, расчете транспортного трафика, прогнозировании роста населения, финансах, генетике, квантовой химии, ядерной физике. Он позволяет решить те задачи, решение которых очень сложно получить численными и аналитическими методами [10].

В данной дипломной работе речь идет о применении метода Монте-Карло в моделировании взаимодействия электронного излучения с веществом. При моделировании для электронов учитываются следующие типы взаимодействий:

- 1) упругие, ионизационные столкновения,
- 2) тормозное излучение.

Прохождение частиц через вещество – это случайный процесс. При использовании различных алгоритмов ЭВМ для моделирования случайных чисел с произвольным распределением можно на основе флуктуаций таких параметров как длина свободного пробега, угол рассеяния, энергия после рассеяния и т. п. получать разнообразные траектории прохождения частиц в веществе, которые приблизительно будут соответствовать реальным. Таким образом можно считать такой процесс моделированием случайного явления [11].

Следующие распределения используются при моделировании углового отклонения электрона в конце отрезка траектории:

- 1) распределение Гоудсмита-Саундерсона – в диапазоне энергий менее 50 МэВ, которое предварительно рассчитывается и табулируется для некоторого количества энергий и отрезков пути определенной длины (s);

- 2) распределение Мольера – для отрезков пути меньше $s/2$ при энергии менее 50 МэВ и для любых отрезков – при энергии более 50 МэВ;

- 3) «распределение Кейла» – для отрезков пути, на которых число столкновений менее 20 и распределение Мольера применять нельзя. Использование этого распределения избавляет от необходимости переходить к модели индивидуальных столкновений для очень тонких слоев вещества [3].

2.3. Программа «PCLab»

Моделирование системы формирования пучка методом Монте-Карло осуществлялось в программе «Компьютерная лаборатория» (КЛ/PCLab), автором которой является сотрудник ТПУ, кандидат физико-математических наук, доцент (ОЯТЦ, ИЯТШ) Валерий Иванович Беспалов.

Ниже перечислены задачи, которые можно решить с помощью КЛ:

1) показать наглядно физические процессы, которые происходят при попадании ионизирующего излучения в вещество;

2) дополнить реальный физический эксперимент более разнообразными начальными данными источника, поглотителя и детектора, чтобы в результате исследований получить не просто число, а физическую закономерность;

3) предоставить возможность проведения численных экспериментов для ряда задач, когда реальный физический эксперимент невозможен из-за отсутствия необходимого лабораторного оборудования [3].

Основой PCLab является пакет программ EPHSA. EPHSA – электронно-фотонный каскад, это пакет различных программ, каждая из которых может решать определенную задачу. Ниже приведены задачи, которые решаются программами EPHSA:

1) расчет характеристик излучения в барьерной геометрии;

2) расчет полей тормозного и рентгеновского излучения;

3) расчет показаний детекторов и радиационных полей излучающих установок;

В дополнение к этому, некоторые программы позволяют проводить расчет с учетом внешнего электрического и магнитного полей [3].

2.3.1. Режим «PHANTOM»

Моделирование проводилось в режиме «PHANTOM». Данный режим работы предназначен для расчета распределения поглощенной дозы в области, выполняющей функции детектора. Имеется возможность задать источник (например, электронный, фотонный или протонный пучок), геометрию, через которую проходит излучение и область-детектор (его форму, материал) [12].

Все режимы работы, в которых проводится моделирование, используют файлы констант, рассчитанные с помощью режима «CONST». В таких файлах указаны различные распределения и константы для частиц и веществ, через которые они проходят. Например, полный средний пробег частицы в определенных материалах (частицы, диапазон их энергий, материалы через которые они проходят задаются, после чего производится расчет файла констант), полная тормозная способность вещества, сечение упругого рассеяния и т.п. Использование этих файлов упрощает моделирование, в них вычислены элементарные константы для частиц с определенной энергией, при прохождении в каком-либо веществе. На основе этой информации уже в другом режиме проводится моделирование. ЭВМ не нужно будет в реальном времени, помимо самой модели просчитывать элементарные константы для частиц и вещества среды [12].

Исходные данные, которые программа использует для процесса моделирования задаются в специальном файле данных. В самой первой строчке файла данных пишется, какой файл констант используется. Важно, чтобы рассчитанный файл констант подходит под задачу, которую необходимо выполнить. Например, если файл предназначен для моделирования с электронами малых энергий, моделировать с высокоэнергетическими электронами уже не получится – программа сообщит об ошибке. То же самое касается и веществ, через которые проходят частицы. Если в файле данных будет задан материал, для которого не вычислены константы, также появится оповещение об ошибке [12].

Важно отметить, что при построении геометрии, для обозначения вещества, из которого состоит какая-либо зона необходимо использовать порядковый номер, соответствующий нужному веществу в файле констант [12].

2.3.2. Параметры файла данных для геометрии и источника

Цифры перед каждым задаваемым параметром соответствуют входным данным, которые использовались при моделировании.

$XY_MAX(mm)$ – максимальный размер всех зон (всей схемы облучения) по X и Y от оси Z . Задается в мм. Это поперечные размеры всей области прямоугольной зоны, в которой проходит моделирование. Уже внутри нее задаются размеры элементов системы формирования пучка и больше чем данный параметр, размер элемента быть не может. В работе он составляет 150 мм [12].

$NLAY_Z, NX_DET, NY_DET$ – $NLAY_Z$, число слоев зоны-детектора по Z , NX_DET и NY_DET – это число интервалов зоны-детектора по X и Y . Эта зона разбита на элементарные ячейки (воксели), в каждой из которых проводится вычисление дозы и других параметров. С помощью данных параметров можно определить число вокселей по всем трем осям. Чем больше задается вокселей, тем более подробное распределение получается, это в свою очередь занимает больше памяти и требует большего количества времени для вычисления. Число слоев по оси Z в моделируемой системе равно 80, по осям X и Y – 70 [12].

LZ – число всех зон схемы облучения по Z . Данный параметр задает число основных квадратных зон вдоль оси Z . Число зон в моделируемой системе равно 30. Основные зоны состоят из основного вещества, помимо этого в основной зоне могут находиться:

а) по одной дополнительной области определенной формы, состоящей из другого дополнительного вещества. Толщина дополнительной области соответствует толщине основной зоны. Центры всех дополнительных областей по X, Y расположены произвольно, их можно задать. Также дополнительные области не пересекаются с границами основных зон по X, Y , но могут их касаться;

б) детектор пучка/опорный детектор, имеющий рабочую область и стенку [12].

Далее, с помощью двух команд задается каждая из 30 зон.

1) 1-я зона, имитирующая вакуумную камеру ускорителя электронов.

$NTYPE_ZON$ – с помощью данной команды задается тип зоны. Для 1-й зоны: 0 – простая (пустая) зона (без объектов), состоящая из одного вещества. NBZ, dZ – параметр команды NBZ задает номер основного вещества зоны, dZ –

толщину данной зона по оси Z . Основного материала в 1-й зоне нету, номеру 10 соответствует вакуум. Толщина составляет 20 мм [12].

2) Зона номер 2. Фольга вакуумного окна ускорителя. Материал фольги соответствует номеру 15 – титан, толщина фольги составляет 55 мкм. Тип зоны – 0, простая зона, состоящая из одного вещества.

3) 3-я зона. Тип – 0, вещество зоны номер 1 – воздух, толщина составляет 5 мм.

4) Зона номер 4. При моделировании имитирует рассеивающую фольгу. Материал фольги – вольфрам, а толщина составляет 0,14 мм. Тип зоны – 0, всю область зоны занимает фольга.

5) 5-я зона. Слой воздуха 8 мм.

6) 6-я зона. Свинцовый коллиматор с коническим отверстием. Толщина данного коллиматора составляет 112 мм, диаметр меньшего отверстия – 8 мм, большего – 60 мм. Ниже показана команда, с помощью которой задается коллиматор:

NTYPE_ZON,

NBZ, dZ, OXO, OYO, RCON1, RCON2, NBO_ZON.

В первой строчке команды указано, что тип зоны – 6. Это зона с дополнительной областью в форме конуса [12].

Вторая строчка команды задает параметры основной и дополнительной зон: вещество основной зоны (сам коллиматор), толщина зоны по оси Z , положение оси конуса, диаметры отверстий и вещество дополнительной зоны [12].

7) Зона 7 имитирует слой воздуха, толщиной 5 мм.

8 – 11) Следующие четыре зоны, с 8 по 11, задают геометрию для дополнительного рассеивающего фильтра. Фильтр имеет сложную ступенчатую форму и для его создания в модели задается 4 зоны 2-го типа. Тип зоны 2 – это зона с дополнительной областью в форме круга состоящей из основного или дополнительного вещества. Материал из которого состоит фильтр – алюминий [12]. На рис. 12 изображена схема фильтра и его геометрические размеры.

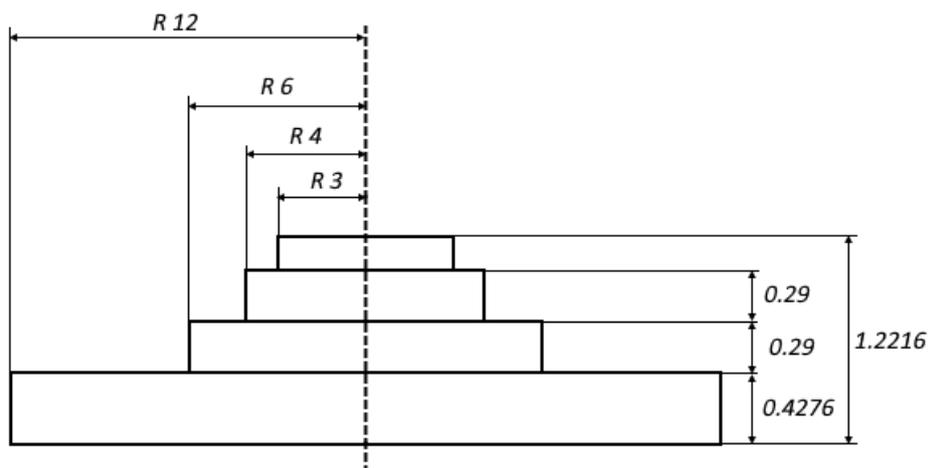


Рисунок 12 – Дополнительный рассеивающий фильтр. Все размеры указаны в мм

Форма рассеивающего фильтра заимствована из работы [13]. Толщина основана на полученных данных из расчета для электронного пучка с энергией 12 МэВ в работе [14].

12) Слой воздуха 10 мм.

13 – 17) Зоны с 13 по 17 имитируют ионизационную камеру. В модели она представляет собой 3 алюминиевые фольги толщиной 5 мкм со слоем воздуха между ними, равным 5 мм. Каждая зона является простой, дополнительные области отсутствуют.

18) Слой воздуха 158 мм.

19 – 20) Данные зоны соответствуют второму подвижному коллиматору. Тип каждой из двух зон – 1, с дополнительной областью в форме прямоугольника. Внутри основной зоны из основного вещества находится прямоугольная область, которая может состоять как из такого же вещества, что и основная зона, так и из дополнительного. Основным веществом зоны является вольфрам, вещество дополнительной, прямоугольной области – воздух. На рис. 13 показана схема и геометрические размеры моделируемого подвижного коллиматора. Центр прямоугольных областей из воздуха расположен на оси Z всей области моделирования.

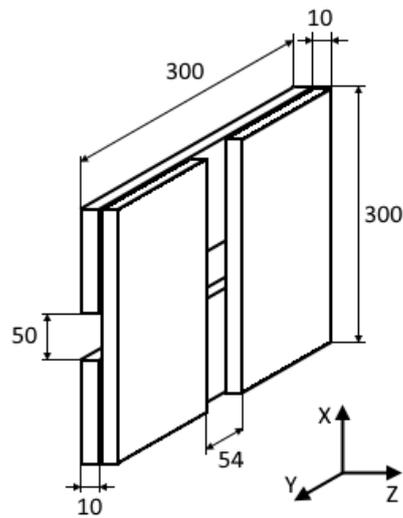


Рисунок 13 – Схема подвижного коллиматора. Все размеры указаны в мм

21) Слой воздуха 193 мм.

23) Слой воздуха 166 мм.

Зона 22 – крепежная пластина, 24, 26 и 28 – пластина-рамка. Тип зоны 22 – 1 (зона с прямоугольной областью), зон 24, 26 и 28 – 9, зона с дополнительной прямоугольной областью-рамкой. Перечисленные четыре зоны в модели выполняют функцию аппликатора. Все его элементы состоят из алюминия. На рис. 14 показана схема пластин-рамок и крепежной пластины аппликатора с обозначенными размерами, а в табл. 1 приведены значения размеров.

Таблица 1 – Геометрические параметры зон, выполняющих функцию аппликатора.

Номер зоны	Элемент системы	Толщина зоны d , мм	a , мм	b , мм	c , мм
22	Крепежная пластина	12,7	120	120	90
24	Пластина-рамка 1	15,8	105	105	30
26	Пластина-рамка 2	15,8	102	102	30
28	Пластина-рамка 3	15,8	100	100	30

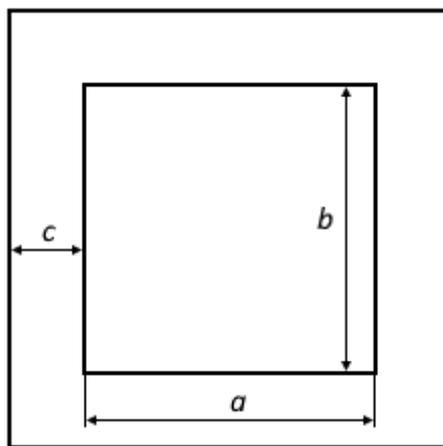


Рисунок 14 – Схема пластин-рамок и крепежной пластины аппликатора

25) Слой воздуха 120 мм

27) Слой воздуха 97,1 мм.

29) Слой воздуха 34,4234 мм.

30) Последняя зона 4-го типа – зона с дополнительной областью в форме прямоугольника, которая является водным фантомом. Дополнительная область может состоять как из основного вещества зоны, так из другого (дополнительного). Поперечные размеры фантома задаются от его центра и равны для осей X и Y – 70 мм. Программа PCLab позволяет вычислять различные параметры внутри водного фантома – распределение электронов в слое, спектр, глубинное дозовое распределение и т.д. [12].

Далее будут перечислены параметры источника.

NGIST – данный параметр отвечает за тип геометрии (пространственного распределения) источника. В модели параметр равен 1, что соответствует плоскому дисковому равномерному источнику. В этом типе геометрии электроны случайным образом вылетают из плоскости, перпендикулярной оси Z [12].

NUIST – угловое распределение источника. Расчет проводился для мононаправленного источника, электроны вылетали в сторону положительного направления оси Z [12].

NPO – тип испускаемых частиц, 1 – электроны.

E0 – начальная энергия частиц, равна 12 МэВ.

FWHM – параметр, отвечающий за полуширину энергетического распределения источника. Разброс энергии равен 0,6 МэВ.

Teta, φ – углы для векторов направления вылета частиц относительно осей Z и X . В модели оба параметра равны нулю градусов, частицы вылетают строго под прямым углом. Положительное направление углов отсчитывается против часовой стрелки. Сначала поворот teta вокруг Y , затем на φ вокруг Z [12].

RIS – параметр, с помощью которого задается радиус источника, единицы измерения мм, в модели радиус пучка равен 2 мм [12].

3. Результаты моделирования

3.1. Влияние элементов системы формирования пучка на спектр электронов

Ниже будут приведены рисунки спектра пучка электронов как до начала прохождения системы формирования, так и после каждого элемента системы. Так же будет кратко написано, каким образом изменились средняя и наиболее вероятная энергии спектра. На рис. 15 приведен спектр электронов, падающих на выводную фольгу вакуумной камеры ускорителя. В конце цикла ускорения в линейном ускорителе в вакуумную камеру попадает пучок электронов с наиболее вероятной энергией 12 МэВ с нормальным распределением по энергии и с полушириной 5 % ($\pm 0,6$ МэВ).

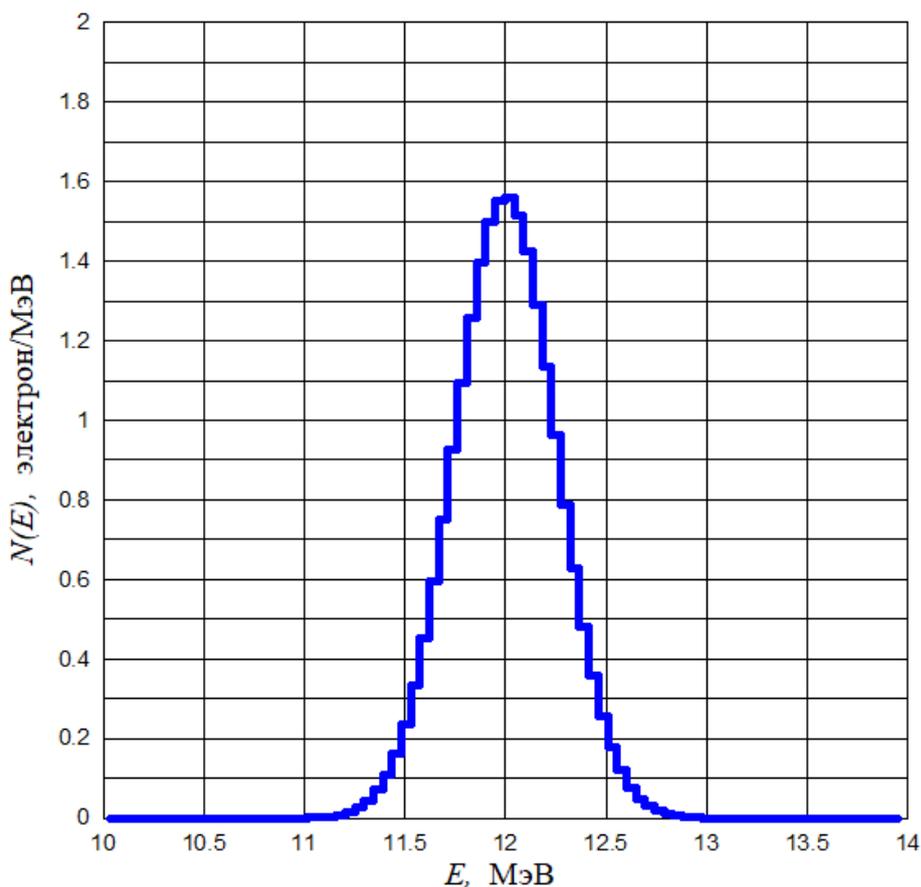


Рисунок 155 – Спектр электронов перед выводной фольгой ускорителя

На рис. 16 изображен спектр электронов после прохождения пучка через титановую фольгу вакуумной камеры ускорителя. Средняя энергия спектра равна 11,81 МэВ, наиболее вероятная – 11,95 МэВ. По сравнению со спектром до

прохождения пучком титановой фольги, значения энергий уменьшились на 0,19 МэВ (1,60 %) и 0,05 (0,42 %) МэВ соответственно. Здесь и далее, в процентах уменьшение значения энергии указывается по отношению к энергии 12 МэВ.

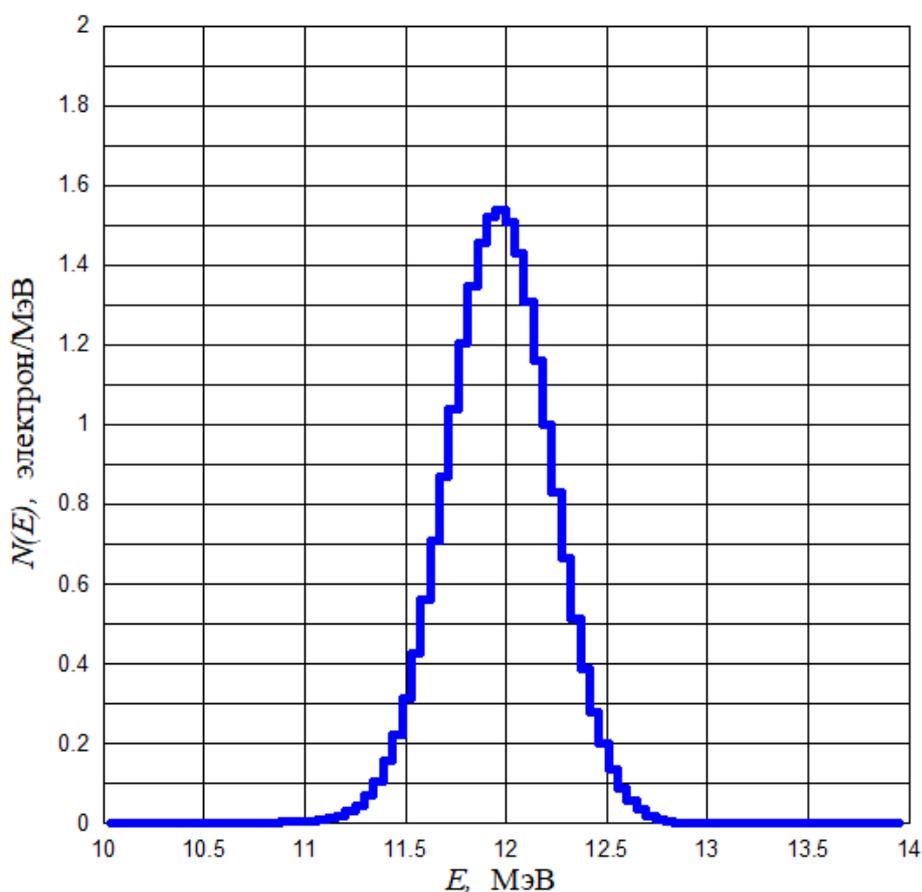


Рисунок 16 – Спектр электронов после прохождения пучка через фольгу вакуумной камеры ускорителя

При прохождении электронного пучка через фольгу из-за рассеяния образуется низкоэнергетическое электронное излучение, которое повышает поверхностную дозу на водном фантоме. На рис. 17 приведен спектр электронов после титановой фольги, только для диапазона энергии от 0 до 14 МэВ и в логарифмическом масштабе по оси ординат. В графике используется логарифмический масштаб, т.к. доля низкоэнергетического излучения слишком мала по сравнению с долей основного излучения и в линейном масштабе невозможно оценить разницу между ними.

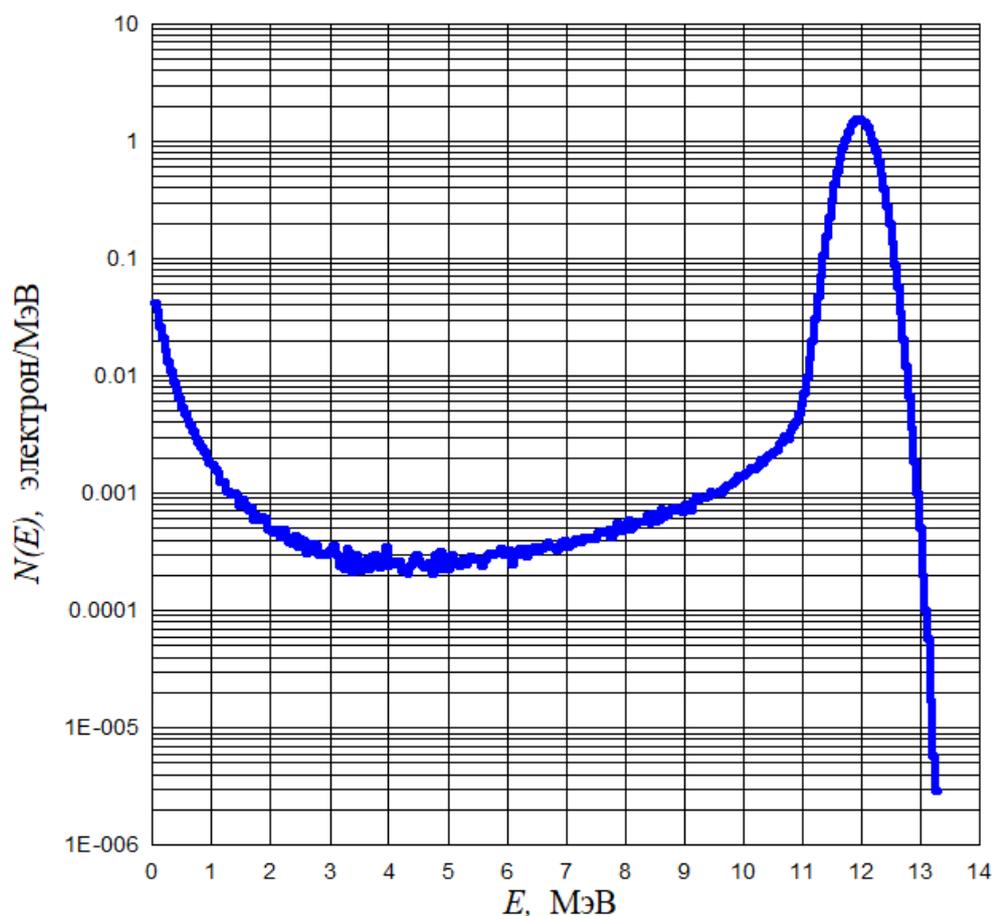


Рисунок 17 – Спектр электронов после прохождения пучка через фольгу вакуумной камеры ускорителя в логарифмическом масштабе по оси ординат

На рис. 18 приведен спектр электронов после прохождения первой рассеивающей фольги из вольфрама. Средняя энергия спектра равна 10,99 МэВ, наиболее вероятная – 11,62. Уменьшение значения средней энергии спектра составило $11,81 - 10,99 = 0,82$ МэВ или 6,83 %, а наиболее вероятной $11,95 - 11,62 = 0,33$ МэВ или 2,75 %. На данном этапе формирования пучка оказывается большее влияние на спектр электронов, чем на предыдущем. Это связано с тем, что материал из которого сделана фольга (вольфрам) имеет более высокое значение плотности. Электроны при прохождении испытывают большое число взаимодействий и теряют больше энергии, чем при прохождении через титан. К тому же толщина рассеивающей фольги больше чем фольги вакуумной камеры.

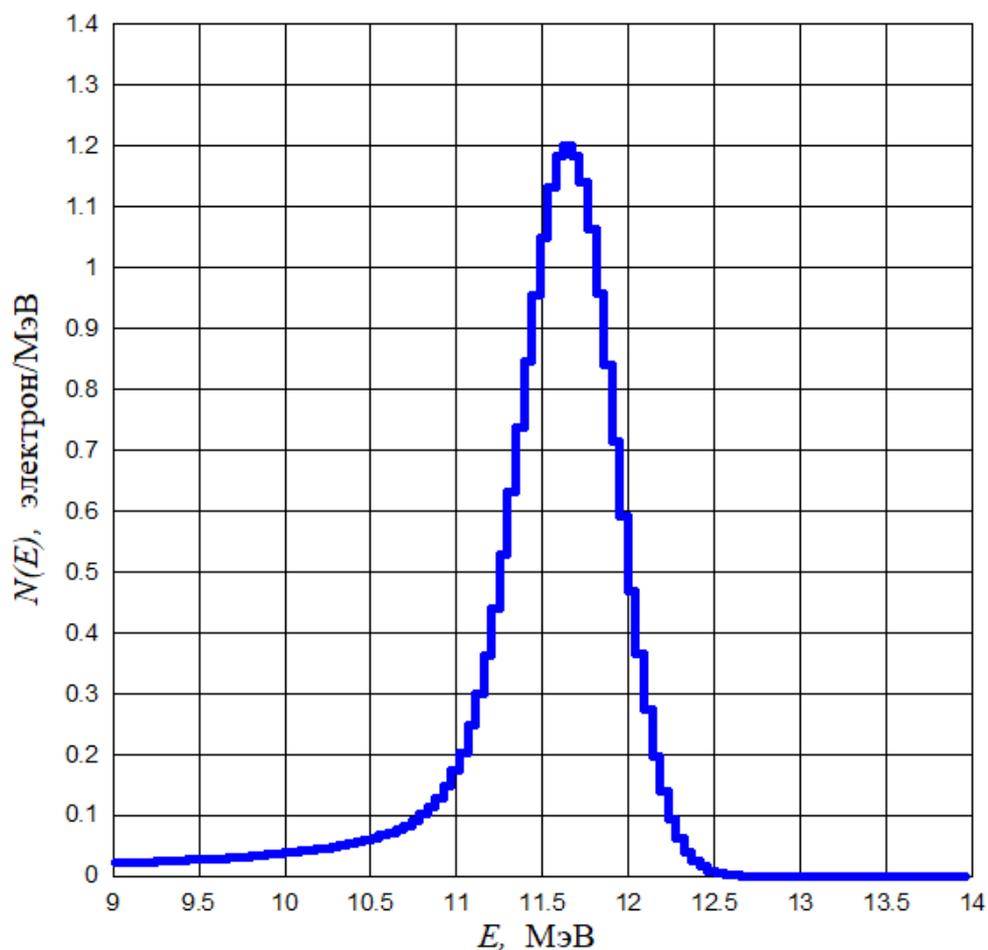


Рисунок 18 – Спектр электронов после прохождения пучка через первую рассеивающую фольгу

На рис. 19 показан спектр электронов после свинцового коллиматора. Значение средней энергии спектра равно 10,62 МэВ, наиболее вероятной 11,58 МэВ. Средняя энергия спектра уменьшилась на 0,37 или 3,08 %, наиболее вероятная на 0,04 или 0,33 %. Влияние на наиболее вероятную энергию спектра электронов очень мало, большее влияние сохраняется для средней энергии спектра, т.к. на данном этапе пучок лишь коллимируется и наиболее вероятная энергия уменьшается за счет рассеяния электронов в воздухе. Средняя энергия уменьшается, т.к. растет количество низкоэнергетического электронного излучения, которое образуется в результате рассеяния электронов на стенке коллиматора.

На рис. 20 приведен спектр электронов после рассеивающего фильтра. Средняя энергия спектра равна 10,53 МэВ, наиболее вероятная – 11,58 МэВ. В результате прохождения электронного пучка через рассеивающий фильтр,

средняя энергия спектра электронов уменьшилась на 0,09 МэВ или 0,75 %.
Наиболее вероятная энергия практически не изменилась.

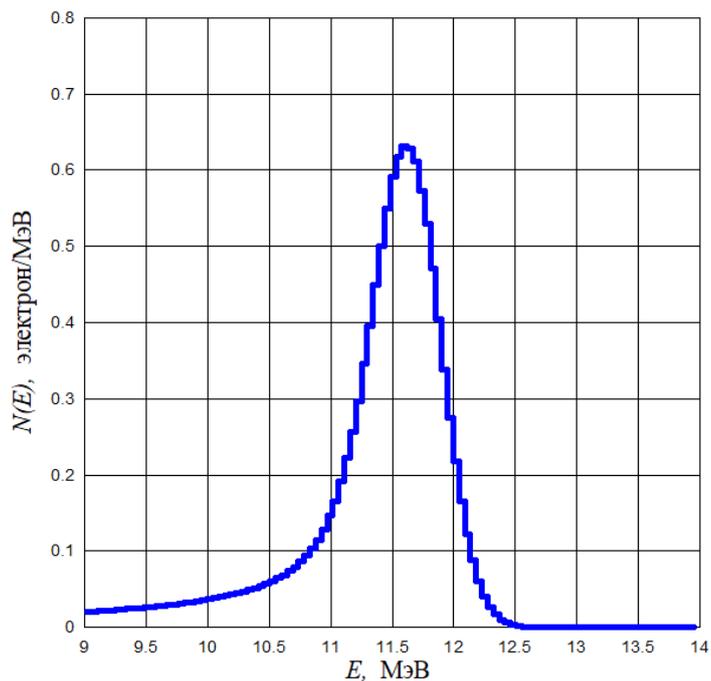


Рисунок 19 – Спектр электронов после прохождения пучка через свинцовый коллиматор

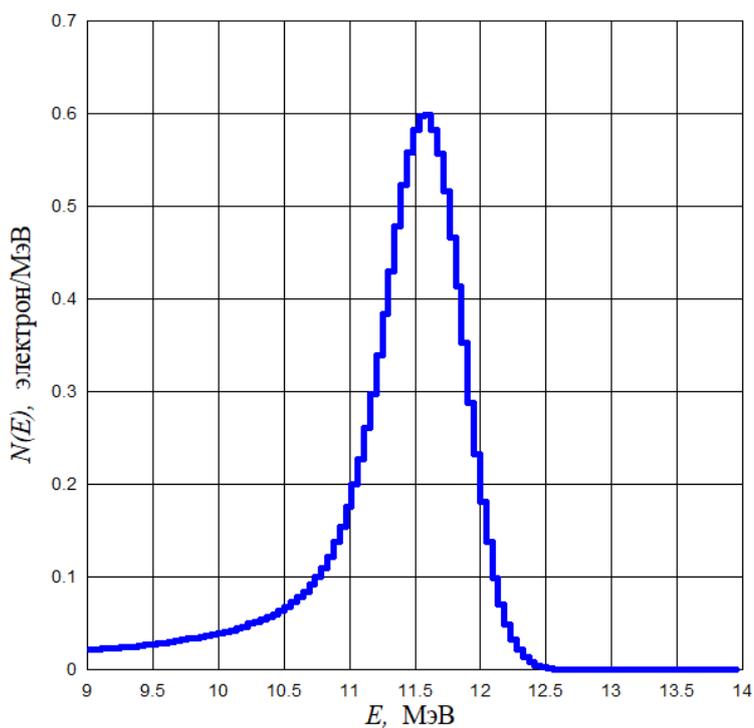


Рисунок 160 – Спектр электронов после прохождения пучка через рассеивающий фильтр

Это связано с тем, что материал фильтра с низким Z (алюминий), при прохождении сквозь фильтр электроны теряют небольшую величину энергии в

результате неупругого рассеяния. Помимо этого, фильтр достаточно тонкий, чтобы формировать равномерное распределение и потери энергии на нем были как можно меньше. На рис. 12 указаны форма и размеры данного фильтра.

На рис. 21 приведен спектр электронов после ионизационной камеры. Средняя энергия спектра равна 10,50 МэВ, наиболее вероятная – 11,53 МэВ. При прохождении электронов через ионизационную камеру, средняя энергия спектра уменьшилась на 0,03 МэВ или 0,25 %, а наиболее вероятная энергия уменьшилась на 0,05 МэВ или 0,42 %.

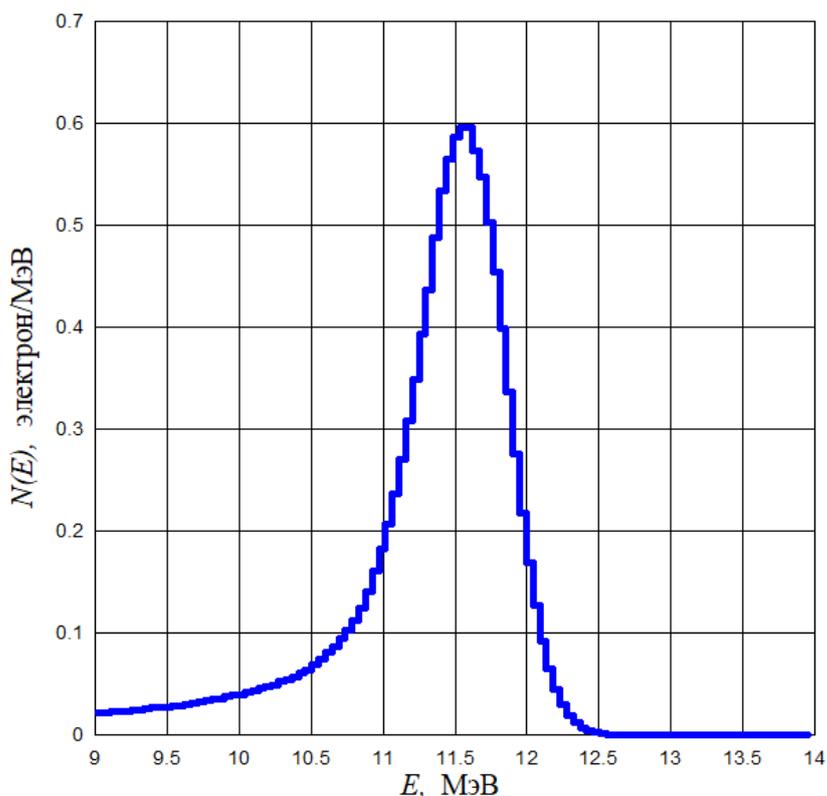


Рисунок 21 – Спектр электронов после прохождения пучка через ионизационную камеру

На рис. 22 изображен спектр электронов после второго подвижного коллиматора. Средняя энергия спектра равна 10,46 МэВ – ее значение уменьшилось на 0,04 или 0,33 %. Наиболее вероятная равна 11,44 МэВ и ее значение уменьшилось на 0,09 МэВ или 0,75 %.

На рис. 23 приведен спектр электронов после прохождения аппликатора. Средняя энергия спектра равна 9,78 МэВ, наиболее вероятная энергия равна

11,20 МэВ. Соответственно значения уменьшились на 0,68 МэВ (5,67 %) и 0,24 МэВ (2,00 %).

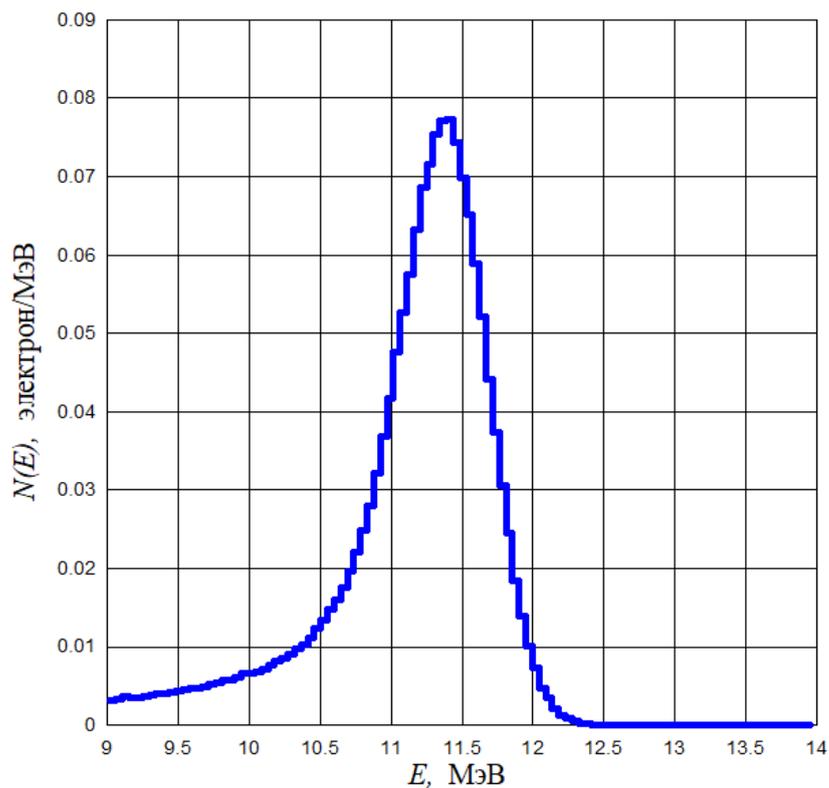


Рисунок 22 – Спектр электронов после прохождения пучка через второй подвижный коллиматор

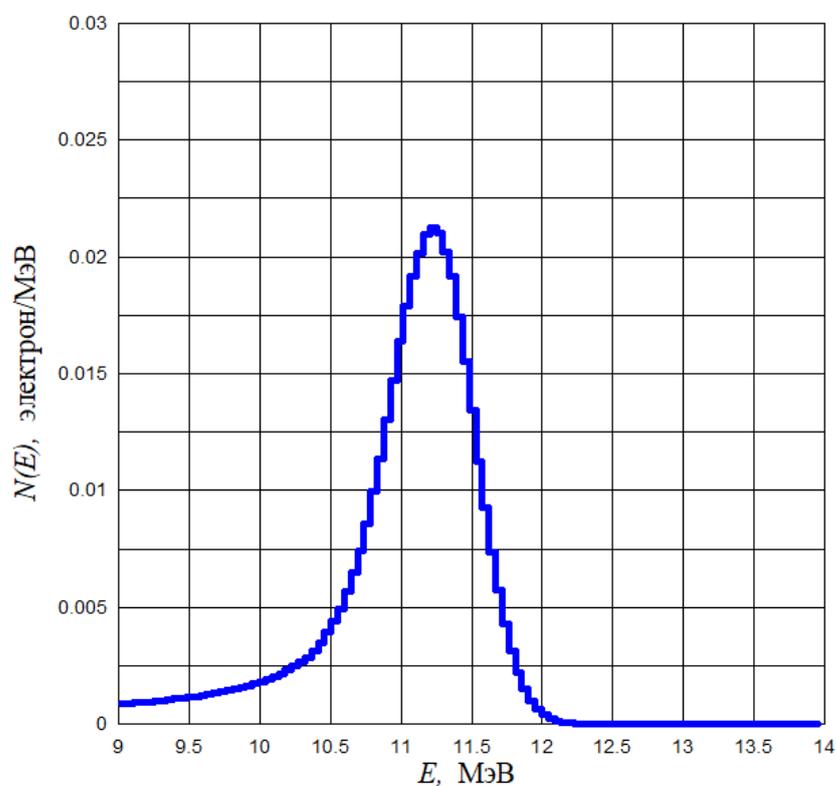


Рисунок 217 – Спектр электронов после прохождения пучка через аппликатор

На рис. 24 показан график уменьшения средней и наиболее вероятной энергии на каждом этапе формирования равномерного электронного пучка. На данном графике указано, на сколько процентов от 12 МэВ уменьшились средняя и наиболее вероятная энергии спектра электронов.

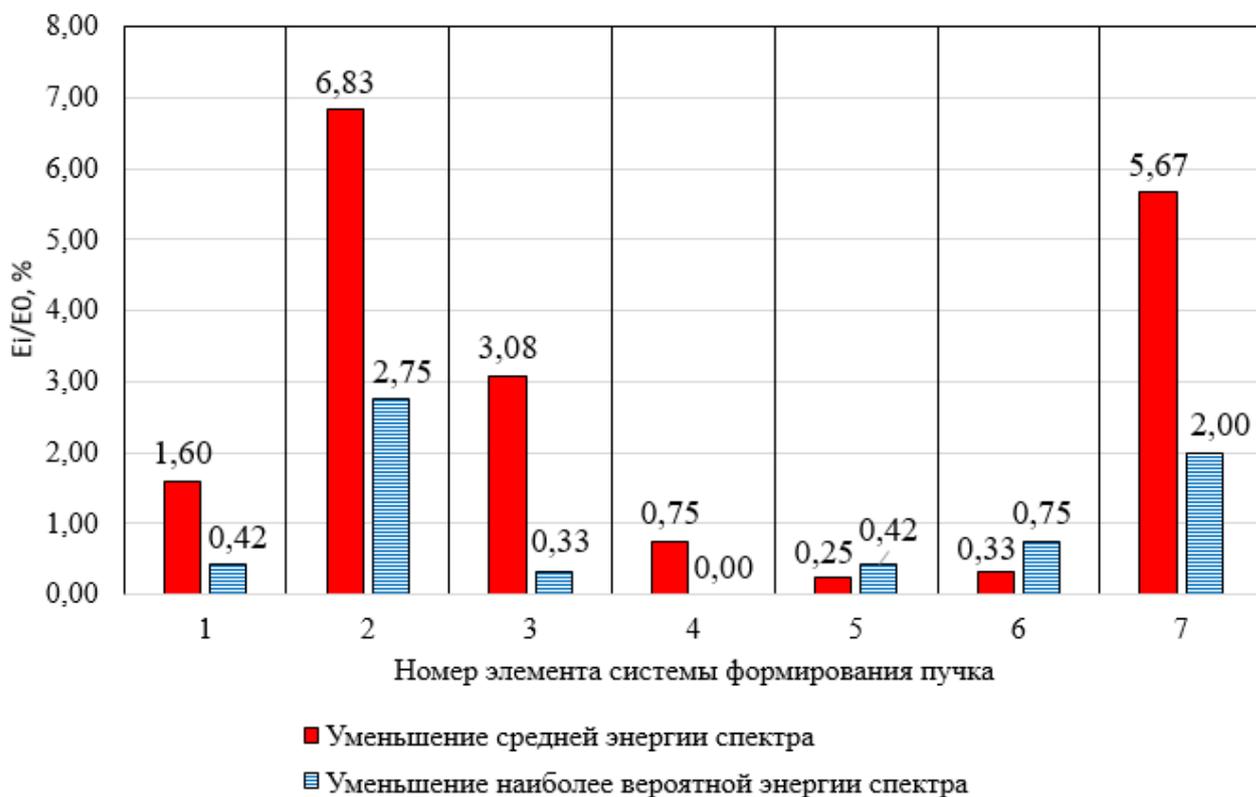


Рисунок 24 – Значения на которые уменьшаются средняя и наиболее вероятная энергия после каждого элемента системы. 1 – фольга вакуумной камеры, 2 – первая рассеивающая фольга, 3 – неподвижный коллиматор, 4 – рассеивающий фильтр, 5 – ионизационная камера, 6 – подвижный коллиматор, 7 – аппликатор

Видно, что большое уменьшение средней энергии спектра происходит на этапах 2 и 7. Как писалось ранее, на этапе 2 это происходит из-за высокой плотности и Z материала рассеивающей фольги. На этапе 7 доля низкоэнергетического электронного излучения в спектре растет из-за рассеяния электронного пучка в большой толщине воздуха (64 см).

Наиболее вероятная энергия спектра больше всего уменьшалась также на 2-м и 7-м этапе. На 2-м этапе уменьшение также, как и для средней энергии спектра связано с прохождением электронов через материал с высокой плотностью и Z . На 7-м этапе такие потери также вызваны прохождением через большой объем воздуха.

По сравнению с начальными характеристиками пучка, средняя энергия спектра электронов уменьшилась на $12,00 - 9,78 = 2,22$ МэВ или 18,5 %, наиболее вероятная энергия – $12,00 - 11,20 = 0,80$ МэВ или 6,67 %.

На рис. 25 показан спектр электронов после прохождения пучком всей системы формирования пучка. При сравнении с рис. 17 видно увеличение доли низкоэнергетического излучения, при прохождении пучка через систему формирования.

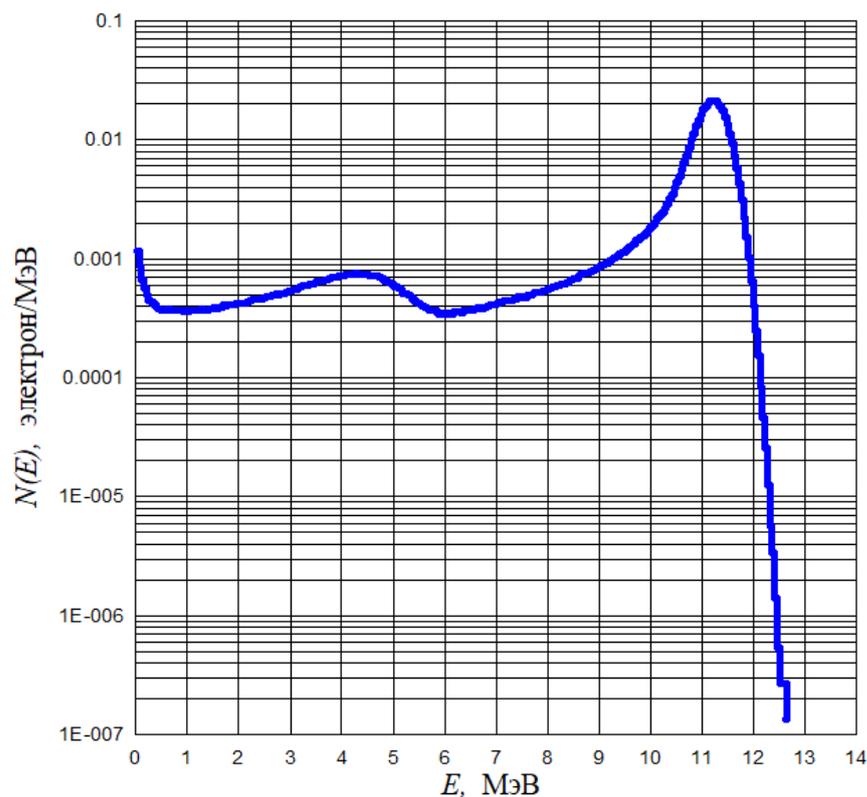


Рисунок 25 – Спектр электронов после прохождения пучка через всю систему формирования

3.2. Распределение плотности электронов

На рис. 26 приведены графики распределения плотности падающих на поверхность водного фантома электронов, построенные на основе данных из результатов моделирования. График слева (а) показывает распределение электронов за титановой фольгой + 100 см воздуха без системы формирования, справа (б) распределение электронов, которое формируется при прохождении пучка через систему. По ним видно, что моделируемая система формирует равномерное распределение электронов.

Из рис. 27 видно, что формируется равномерное распределение в интервале от -50 до 50 мм, что и требовалось от модели при создании облучаемой площади 10 x 10 см².

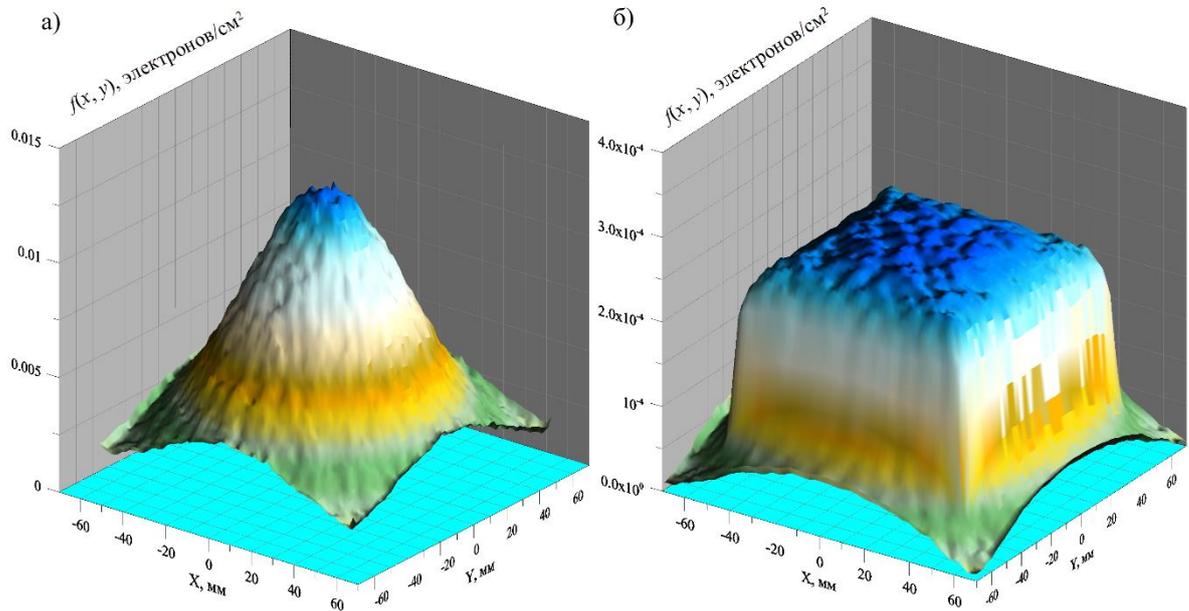


Рисунок 26 – Распределение плотности электронов в 1 слое водного фантома, а) титановая фольга + 100 см воздуха, без системы формирования пучка, б) вся система формирования пучка

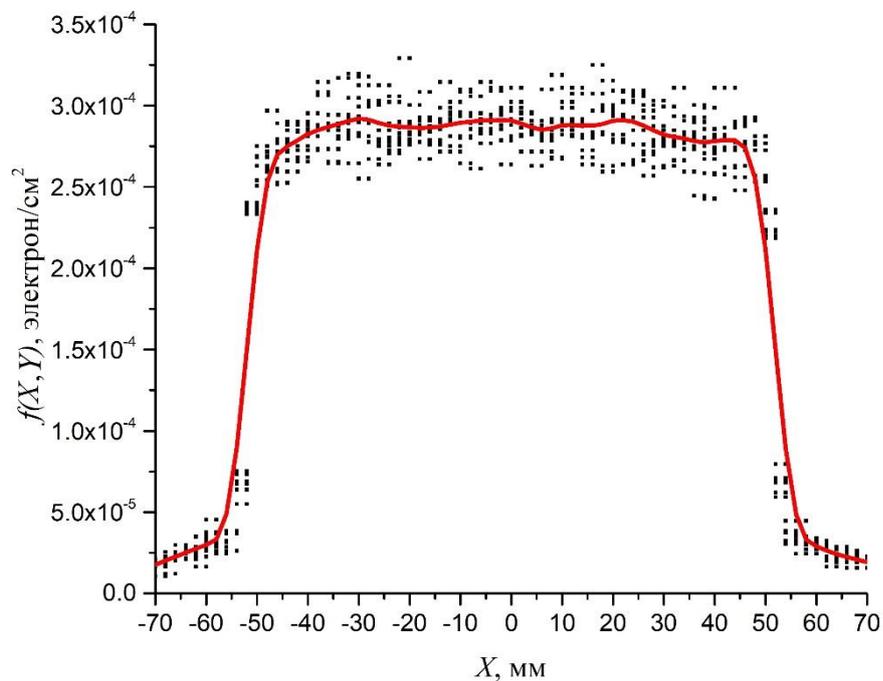


Рисунок 27 – Распределение плотности электронов в 1 слое водного фантома при $Y = 0$

Сплошная линия на рис. 27 результат сглаживания методом «Lowess» (аббревиатура, которая переводится как «сглаживание по локально взвешенной линейной функции») [15].

3.3. Распределение процентной глубинной дозы в водном фантоме

На основе данных из результатов моделирования было построено распределение процентной глубинной дозы электронов в водном фантоме. На рис. 28 приведены две кривые распределения ПГД – для рассчитанных в PCLab данных и экспериментальных данных ускорителя SIEMENS ONCOR для электронного пучка с номинальной энергией 12 МэВ и площадки 10 x 10 см² и РИП = 100 см.

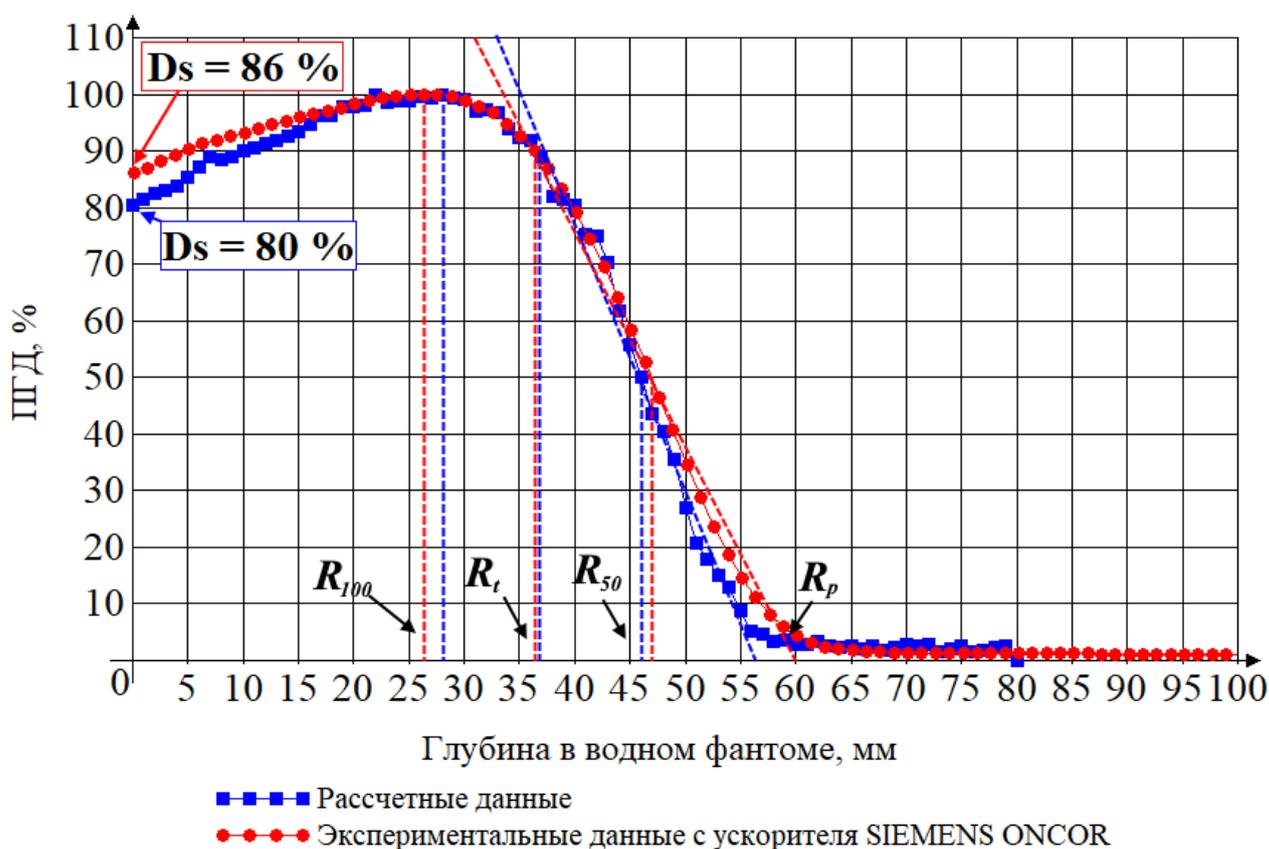


Рисунок 28 – Распределение процентной глубинной дозы электронов в водном фантоме для расчетных и экспериментальных данных

Как видно из сравнения двух кривых на данном графике, такие параметры как поверхностная процентная глубинная доза D_s , глубина на которой достигается максимальная поглощенная доза в водном фантоме R_{100} , терапевтический диапазон R_t , глубина R_{50} на которой достигается доза $\frac{1}{2}$ от D_{max}

и практический диапазон у расчетных и экспериментальных данных не совпадают. Сильное различие прослеживается для поверхностной процентной глубинной дозы и практического диапазона, данные параметры существенно влияют на процесс лечения, в частности поглощенную дозу на поверхности, т.е. коже пациента, и глубину проникновения электронного излучения. В табл. 2 приведены значения указанных на графике параметров для расчетной и экспериментальной кривой.

Таблица 2 – Параметры кривых распределения ПГД для расчетных и экспериментальных данных

Параметр кривой	Расчет в PCLab	Экспериментальные данные
D_s , %	80	86
R_{100} , мм	28	26
R_t , мм	36,5	36,3
R_{50} , мм	46	47
R_p , мм	56	60

Для соответствия расчетной кривой экспериментальной была проведена корректировка начальной энергии электронного пучка. Проводился расчет при энергиях 12,4 МэВ и 12,8 МэВ при тех же параметрах системы формирования. На рис. 29 приведены кривые для 2-х результатов расчета и экспериментальных данных, а в табл. 3 значения параметров для каждой из кривой. На графике и по значениям в таблице видно, что наибольшее совпадение с экспериментальной кривой достигается для электронного пучка с начальной энергией 12,4 МэВ.

Таблица 3 – Параметры кривых распределения ПГД при корректировании начальной энергии пучка

Параметр кривой	Электронный пучок 12,4 МэВ	Электронный пучок 12,8 МэВ	Экспериментальные данные
D_s , %	85,4	90,4	86
R_{100} , мм	28,2	33	26
R_t , мм	37	37,7	36,5
R_{50} , мм	47	47,5	47
R_p , мм	60	61	60

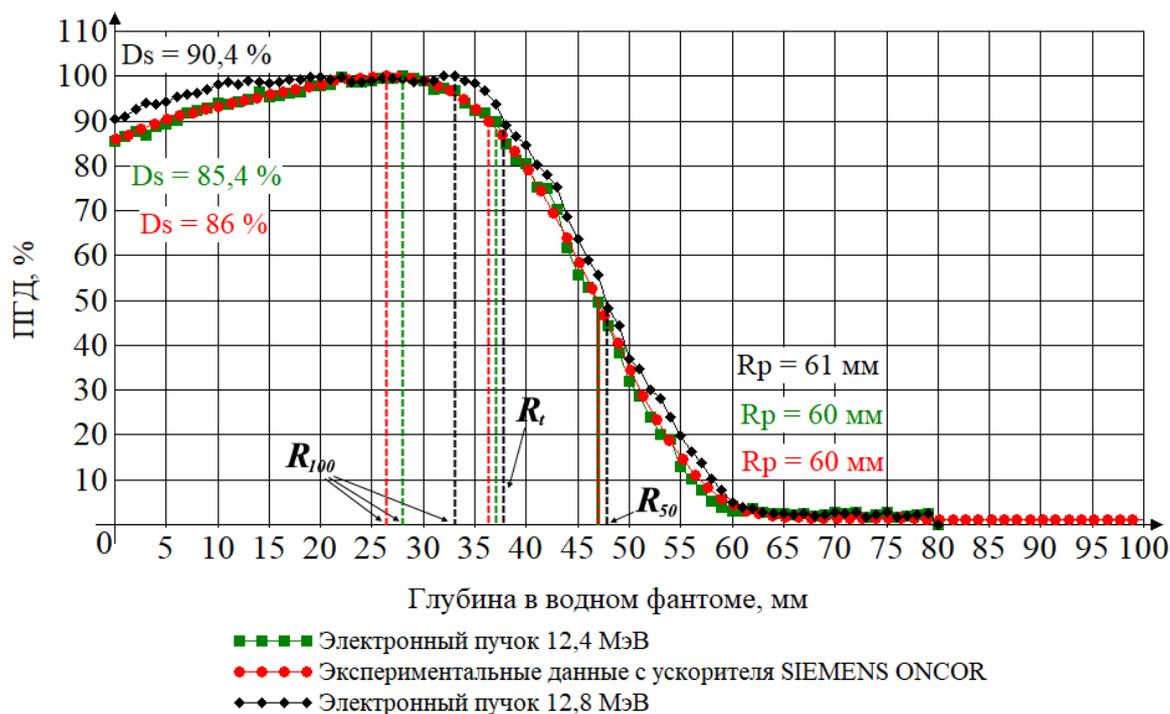


Рисунок 29 – Сравнение распределения ПГД для сформированных электронных пучков с начальными энергиями 12,4 и 12,8 МэВ с кривой на основе экспериментальных данных

3.4. Расчет распределения ПГД с использованием плоского источника

Для ускорения расчета процесс моделирования делят на несколько этапов. На первом этапе рассчитывают ПИ – плоский источник. Он представляет собой набор данных о вылетающих из определенной области частиц – их тип, энергия, направляющие косинусы, положение относительно осей X и Y и статистический вес. Этот этап занимает много времени, поскольку необходимо рассчитать данные для большого числа частиц, чем больше их рассчитано, тем больше точность [16].

На втором этапе целесообразно проводить расчет еще одного ПИ. Он записывает характеристики частиц, прошедших геометрию с определенными РИП и площадью профиля пучка. На третьем этапе выполняется расчет распределения дозы от плоского источника для определенной энергии и параметров системы формирования [16].

В данной работе расчет ПИ проводился для стандартных параметров системы формирования пучка РИП = 100 см и площади облучения на

поверхности фантома $10 \times 10 \text{ см}^2$. На 1-м этапе расчета плоский источник был расположен перед подвижным коллиматором. Это связано с тем, что при изменении площади облучаемой поверхности меняются параметры подвижного коллиматора и аппликатора. Если возникнет необходимость провести моделирование для другой площади поверхности, можно будет использовать ПИ 1-го этапа – это позволит сократить время расчета, т.к. при моделировании будет проводиться расчет для меньшего числа элементов системы.

В предыдущем подразделе указано, что наибольшее соответствие экспериментальной кривой ПГД достигается при энергии электронного пучка 12,4 МэВ – для этого значения был проведен расчет с плоским источником. На 2-м этапе расчета плоский источник в модели размещался сразу после аппликатора. Источником излучения при расчете ПИ 2-го этапа был ПИ 1-го этапа – геометрия расчета второго ПИ содержала только подвижный коллиматор и аппликатор. После расчета ПИ 2-го этапа был сделан расчет распределения ПГД. Геометрия расчета состояла из слоя воздуха 10 см, далее располагался водный фантом. На рис. 30 показана схема размещения плоских источников в геометрии системы формирования.

Расчет с применением плоского источника занимает гораздо меньше времени, чем расчет полностью всей модели. При использовании только ПИ 1-го этапа расчет осуществляется быстрее в 1,8 раз, с применением ПИ 2-го этапа в 40 раз. На рис. 31 приведены кривые распределения ПГД для двух вариантов расчета: с и без использования ПИ. В табл. 4 приведены значения параметров кривых распределения ПГД из рис. 31.

Таблица 4 – Параметры кривых распределения ПГД

Параметр кривой	Расчет без ПИ	Расчет с ПИ
$D_s, \%$	85,4	84,5
$R_{100}, \text{ мм}$	28	28
$R_t, \text{ мм}$	36,5	37
$R_{50}, \text{ мм}$	46,5	46,5
$R_p, \text{ мм}$	60	60

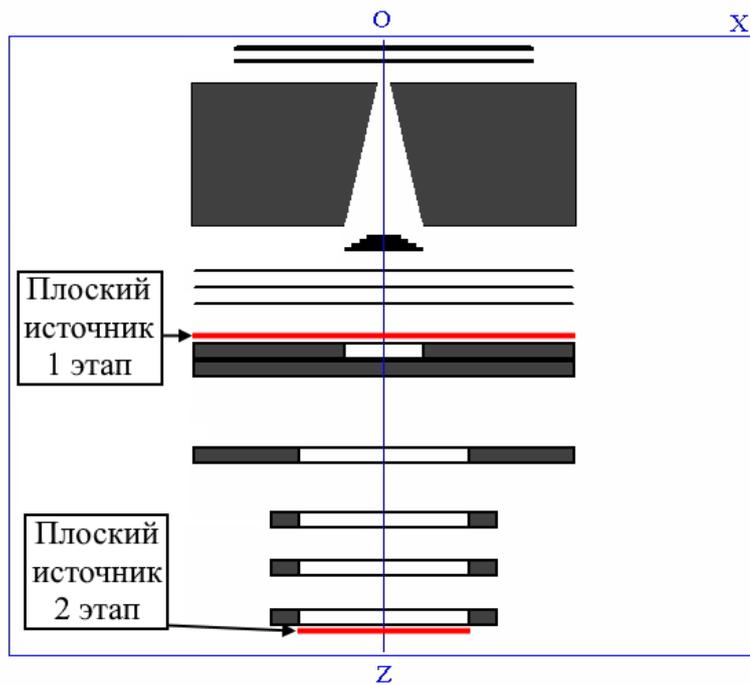


Рисунок 30 – Схема размещения плоских источников в геометрии системы формирования пучка

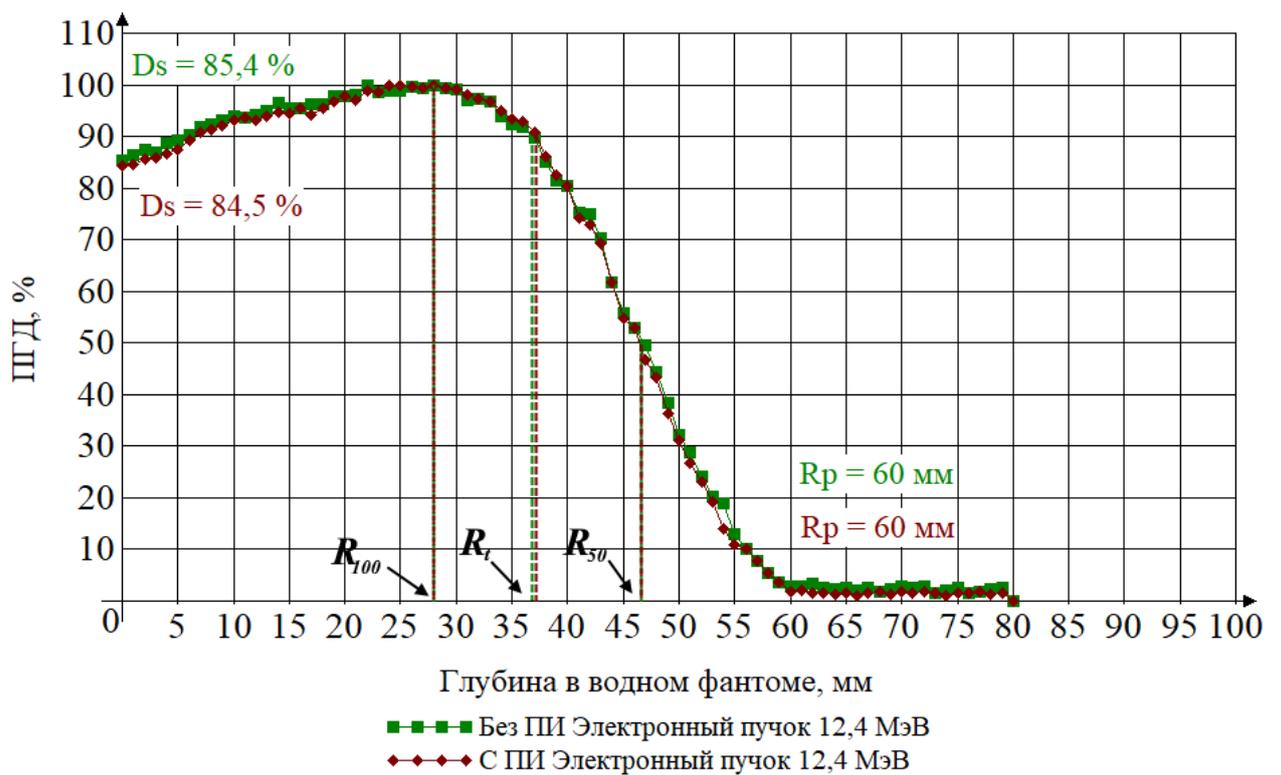


Рисунок 31 – Распределение ПГД для расчетов с и без использования плоского источника

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Введение для раздела

К настоящему времени, успех реализации НИР зависит не от преимущества в технических параметрах над конкурентными исследованиями, а от востребованности на рынке, цене реализации, необходимого для исследования бюджета, а также времени для успешного внедрения на рынок.

В данном разделе приводится оценка коммерческой ценности и перспективности описываемого в ВКР исследования. Осуществляется данная оценка посредством решения следующих задач:

- 1) Оценка коммерческого потенциала разработки.
- 2) Планирование научно-исследовательской работы;
- 3) Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- 4) Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной ВКР – на основе статистического моделирования рассчитать характеристики электронного пучка, падающего на водный фантом после прохождения всех типовых элементов формирования пучка и из сравнения расчетных и экспериментальных распределений определить необходимые начальные характеристики пучка.

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

4.2.1. Анализ конкурентных технических решений

Основой анализа конкурентного технического решения будет выбор технического исполнения задачи. В качестве собственного варианта технического исполнения работы будем считать использование программы «PCLab». PCLab – программа, предназначенная для моделирования методом Монте-Карло процессов распространения электронов, позитронов, фотонов и протонов в веществе, автором которой является кандидат физико-

математических наук, доцент (ОЯТЦ, ИЯТШ) Валерий Иванович Беспалов. В качестве конкурентного Geant – инструментарий для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло, разработанный в CERN. Ниже приведена таблица сравнения собственного технического исполнения с конкурентными (табл. 5).

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{кл}	К _ф	К _{кл}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Удобство интерфейса.	0,07	4	3	0,28	0,21
2. Удобство установки.	0,1	5	3	0,5	0,3
3. Предоставляемые возможности моделирования.	0,2	4	5	0,8	1
4. Срок выполнения поставленной задачи, при использовании тех. решения.	0,3	4	4	1,2	1,2
5. Начальные навыки для пользования.	0,2	4	3	0,8	0,6
Экономические критерии оценки эффективности					
6. Финансовая доступность для пользователя	0,13	4	5	0,52	0,65
Итого	1	25	23	4,1	3,96

Проведенный анализ показывает, что для выполнения исследования лучше подходит используемое техническое исполнение.

4.2.2. SWOT-анализ

В табл. А.1 приложения А приведена итоговая SWOT-матрица, содержащая в себе оценку сильных и слабых сторон технического исполнения задания, а также их связь с возможностями и угрозами.

Табл. 6, 7, 8 и 9 показывают соответствие сторон возможностям и угрозам. Знак «+» означает сильное соответствие, знак «-» – слабое.

Таблица 6 – Соответствие сильных сторон возможностям

Сильные стороны								
Возможности		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	B1	-	-	+	-	-	+	-
	B2	-	-	+	+	-	+	-
	B3	-	-	+	+	+	+	+
	B4	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 7 – Соответствие слабых сторон возможностям

Слабые стороны					
Возможности		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	-	-	-	-
	B2	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-
	B4	+	+	-	+

Таблица 8 – Соответствие сильных сторон угрозам

Сильные стороны								
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	У1	-	-	-	+	-	-	-
	У2	+	+	+	-	-	-	-

Таблица 9 – Соответствие слабым сторонам угрозам

Слабые стороны					
Угрозы		C1	C2	C3	C4
	У1	-	+	+	-
	У2	-	-	+	-

Судя по преимуществам и недостаткам, использование данного варианта технического исполнения является оправданным. Анализ возможностей и угроз поможет в будущем устранить недостатки технического исполнения и в целом увеличить эффективность работы.

4.3. Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- 1) определение структуры работ в рамках научного исследования;
- 2) определение количества исполнителей для каждой из работ;
- 3) установление продолжительности работ;
- 4) построение графика проведения научных исследований.

Сформирована рабочая группа, состоящая из 2-х человек – руководителя и инженера, определены основные этапы, порядок и содержание работ. Для каждого этапа определены исполнители, данные приведены в табл. 10.

Таблица 10 – Основные этапы, содержание и исполнители работы

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Руководитель
	2	Календарное планирование выполнения ВКР	Инженер, руководитель
Теоретическое исследование	3	Планирование моделирования	Инженер
	4	Подготовка файлов данных	Инженер
	5	Проведение моделирования	Инженер
Обобщение и оценка результатов	6	Обработка полученных данных	Инженер, руководитель
	7	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, руководитель
Оформление отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	Инженер

4.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

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

Для того чтобы определить ожидаемое (среднее) значение трудоемкости использована следующая формула:

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

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (3)$$

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

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

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

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4):

$$T_{ki} = T_{pi} k_{кал}, \quad (4)$$

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

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

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

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{вых}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Далее (рис. 32) приведен календарный план-график с диаграммой Ганта, построенный на основе таблицы А.2 приложения А.

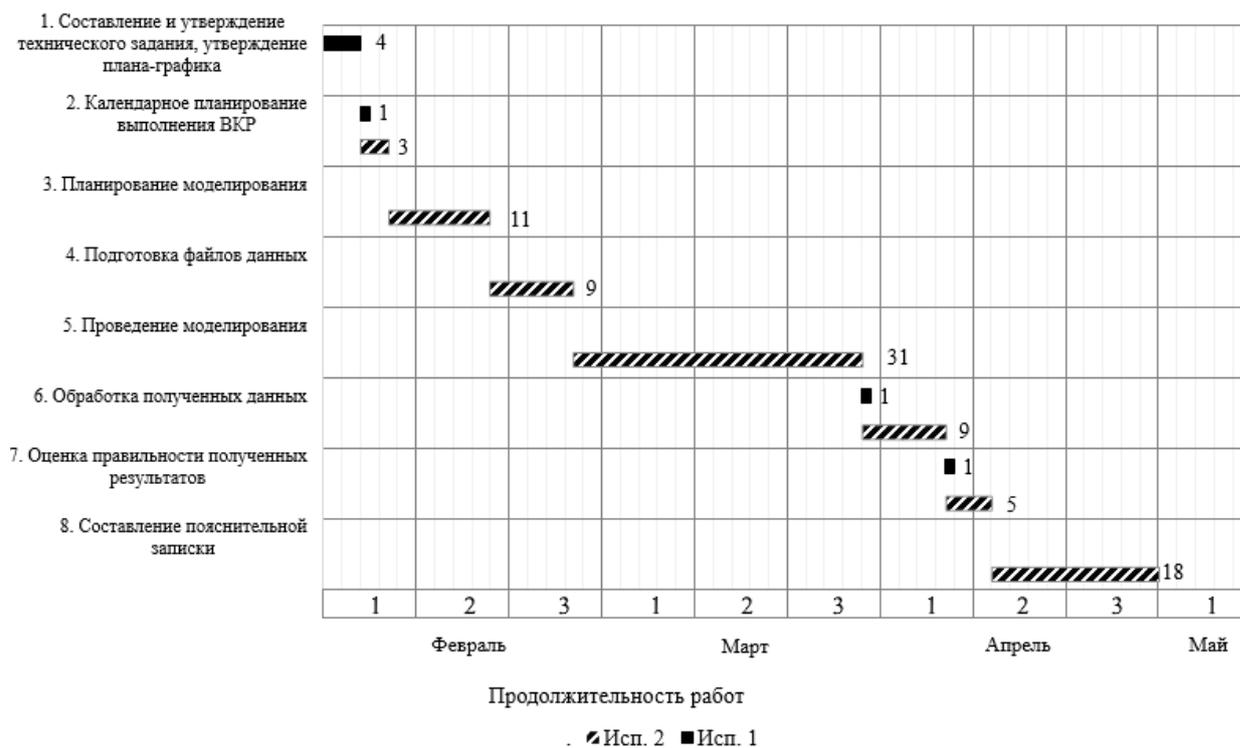


Рисунок 32 – Диаграмма Ганта

Общее число календарных дней, в течении которых выполнялась работа – 90; число календарных дней, в течении которых работал инженер – 86, руководитель – 7.

4.3.3. Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовалась группировка затрат по следующим статьям:

- 1) материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- 2) затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- 3) основная заработная плата исполнителей темы;
- 4) дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- 5) отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 6) накладные расходы НИР.

4.3.3.1. Расчет материальных затрат научно-технического исследования

В табл. 11 приведены все использованные при выполнении исследования принадлежности, их цена за единицу, количество использованных единиц и общая стоимость затрат.

Таблица 11 – Материальные затраты

Наименование	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Комплекс канцелярских принадлежностей	275	3	825
Картридж для лазерного принтера Sactus CS-P76A, черный	230	1	230
Итого:			1055

4.3.3.2. Расчет амортизации специального оборудования

Какое-либо специальное оборудование для работы дополнительно не закупалось. В данной главе будет осуществляться расчет амортизации оборудования, которое было приобретено еще до начала выполнения работ.

При выполнении работы использовался ПЭВМ – ноутбук Lenovo IdeaPad S145-15API и ПО «PCLab» (Примем срок полезного использования 1 год). Срок полезного использования данного ноутбука по паспорту составляет 4 года. Количество рабочих дней, в течении которых использовался ноутбук составляет 60. Все данные и результаты приведены в табл. 12.

Таблица 12 – Амортизация

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Срок использования в рамках исслед.,	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.	Амортизация, руб.
1	Ноутбук Lenovo IdeaPad S145-15API	1	4	60	33,199	1364
2	PCLab	1	1	40	1800	197
Итого:				1561 руб.		

Рассчитаем норму амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 4 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{4} = 0,25. \quad (6)$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A * И}{365} d = \frac{0,25 * 33199}{365} * 60 = 1364 \text{ руб.} \quad (7)$$

Аналогичные расчеты для PCLab:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{1} = 1. \quad (8)$$

$$A = \frac{H_A * И}{365} d = \frac{1 * 1800}{365} * 40 = 197 \text{ руб.} \quad (9)$$

4.3.3.3. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью исследования и действующей системой оклада.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} * T_p, \quad (10)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m * M}{F_d} = \frac{49725 * 10,3}{246} = 2082 \text{ руб.}, \quad (11)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;

– при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m * M}{F_d} = \frac{29250 * 11,2}{213} = 1538 \text{ руб.} \quad (12)$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_m = Z_{тс}(1 + k_{пр} + k_d)k_p = 25500(1 + 0,3 + 0,2)1,3 = 49725 \text{ руб.}, \quad (13)$$

– для инженера:

$$Z_m = Z_{тс}(1 + k_{пр} + k_d)k_p = 15000(1 + 0,3 + 0,2)1,3 = 29250 \text{ руб.}, \quad (14)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_d – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 13 – Рабочее время исполнителей темы

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 14 – Заработная плата исполнителей темы

Исполнители НИ	$Z_{тс}$, руб	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб
Руководитель	25500	0,3	0,2	1,3	49725	2082	5,1	10618,2
Инженер	15000	0,3	0,2	1,3	29250	1538	57,6	88588,8
Итого:								99207

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн} = 0,15 * 10618,2 = 1593 \text{ руб.}, \quad (15)$$

– для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн} = 0,15 * 88588,8 = 13288 \text{ руб.}, \quad (16)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (принимается равным 0,15).

4.3.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 (10618,2 + 1593) = 3663,4 \text{ руб.} \quad (17)$$

– для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 (88588,8 + 13288) = 30563 \text{ руб.} \quad (18)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.3.3.5. Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д.

Рассчитывается общая сумма накладных расходов следующим образом:

$$З_{накл} = (1561 + 1055 + 99207 + 14881 + 34226,4) * 0,2 = 30146,7 \text{ руб.}, \quad (19)$$

где $k_{нр} = 0,2$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Ниже приведена таблица 15, в которой указаны все статьи затрат и их величина.

Таблица 15 – Статьи затрат НИР

Статьи затрат.							
Амортизация	Материальные затраты	Осн. зар. плата	Доп. зар. плата	Отчислен ия на соц. нужды	Итого. Без наклад. расх.	Накладные расходы	Итого. бюджет. стоим.
1561	1055	99207	14881	34226,4	150930,4	30186,1	181116,5

* – цифры приведены в рублях.

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

Рассчитаем для определения эффективности исследования интегральный показатель эффективности научного исследования, путем определения

интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

В качестве аналогов рассмотрим варианты исполнения исследования с использованием разных ЭВМ для проведения только моделирования:

1) Использование стационарного ПЭВМ А6100 (А6366LNi): Pentium Gold G5400/4 Гб/1 Тб/UHD Graphics 610/DVDRW/Win10 Home, стоимостью 30800 руб., Монитор HP 19ка за 4099 руб., клавиатура + мышь 700 руб. (Срок полезного использования 4 года, в рамках исследования – 60 дней, как у ноутбука, Исп. 2).

2) Использование виртуального сервера для расчетов. Стоимость аренды сервера с подходящими характеристиками – 579 руб./месяц (Срок использования 60 дней, Исп. 3).

Таблица 16 – Сравнение статей затрат текущего и конкурентных вариантов исполнения

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		
		Текущее исслед.	Исп.2	Исп.3
1	Материальные затраты НИР	1055	1055	1055
2	Амортизация	1561	1660	1355
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	99207	99207	99207
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	14881	14881	14881
5	Отчисления во внебюджетные фонды	34226,4	34226,4	34226,4
6	Накладные расходы	30186,1	30186,1	30186,1
Бюджет затрат НИР		181116,5	181215,5	180910,5

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (20)$$

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

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.ис.}} = 181116,5$ руб, $\Phi_{\text{исп.2}} = 181215,5$ руб, $\Phi_{\text{исп.3}} = 180910,5$ руб.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.ис.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.ис.}}}{\Phi_{\max}} = \frac{181116,5}{181215,5} = 0,999; \quad (21)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\max}} = \frac{181215,5}{181215,5} = 1; \quad (22)$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{\text{исп.3}}}{\Phi_{\max}} = \frac{180910,5}{181215,5} = 0,998. \quad (23)$$

Как видно из рассчитанных интегральных показателей, используемый вариант является средним, между двумя аналогами.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР I_{pi} определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 17).

Таблица 17 – Интегральные показатели вариантов исполнения

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текуще исслед.	Исп.2	Исп.3
1. Сроки выполнения работы	0,3	5	5	5
2. Стабильность работы	0,3	5	5	3
3. Технические характеристики	0,4	4	4	5
Итого:	1	4,6	4,6	4,4

Расчет интегрального показателя для исследования:

$$I_{p1} = 0,3 * 5 + 0,3 * 5 + 0,4 * 4 = 4,6; \quad (24)$$

$$I_{p2} = 0,3 * 5 + 0,3 * 5 + 0,4 * 4 = 4,6; \quad (25)$$

$$I_{p3} = 0,3 * 5 + 0,3 * 3 + 0,4 * 5 = 4,4; \quad (26)$$

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

$$I_{\text{исп.i}} = \frac{I_{p-\text{исп.i}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.i}}} \cdot \quad (27)$$

$$I_{\text{текущ.ис.}} = \frac{4,6}{0,999} = 4,6; I_{\text{исп.2}} = \frac{4,6}{1} = 4,6; I_{\text{исп.3}} = \frac{4,4}{0,998} = 4,4. \quad (28)$$

Ниже приведена сравнительная таблица интегральных показателей.

Таблица 18 – Сравнение интегральных показателей вариантов исполнения

№ п/п	Показатели	Текущее исслед.	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,999	1	0,998
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	4,6	4,4
3	Интегральный показатель эффективности	4,6	4,6	4,4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1	0,96

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективными является вариант 1 (текущее исслед.) и 2.

4.5. Выводы по разделу

В результате работы над разделом был проведен анализ коммерческого потенциала разработки, был составлен календарный план-график НИР, рассчитан ее бюджет, а также определена ресурсная, финансовая эффективность в сравнении с аналогичными вариантами исполнения.

Анализ потенциала разработки показал, что в сравнении с конкурентным, используемое решение имеет больше преимуществ, которые можно увидеть в табл. 5.

В результате SWOT-анализа (табл. А.1 приложения А) были определены сильные и слабые стороны, возможности и угрозы исследования, а также их взаимосвязь.

При планировании НИР были обозначены основные этапы, содержание и трудоемкость работ, определены роли исполнителей (табл. 10). Для каждой работы в рамках исследования была указана продолжительность в рабочих и календарных днях и составлена диаграмма Ганта (табл. А.2 приложения А, рис. 32).

В результате расчета бюджета НИР были определены основные статьи затрат: амортизация, материальные затраты, основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления на социальные нужды и накладные расходы. Результаты расчета приведены в табл. 15.

В последней главе раздела были рассчитаны показатели финансово- и ресурсоэффективности. На основе полученных показателей среди всех рассмотренных аналогов был сделан вывод о том, что используемый вариант исполнения исследования как минимум не уступает другим.

Раздел выполнен на основе методики из пособия [17].

5. Социальная ответственность

5.1. Введение для раздела

Задачей ВКР является разработать компьютерную модель формирования терапевтического электронного пучка медицинского линейного ускорителя на энергию 12 МэВ. Разработанная модель, при соответствии всем требованиям, может применяться в медицине для лечения злокачественных опухолей с помощью линейных медицинских ускорителей электронов. Потенциальными пользователями данного проекта являются сотрудники медицинских учреждений, имеющих необходимую для работы на ускорителе квалификацию.

В данном разделе рассматриваются правовые и организационные вопросы безопасности при разработке и использовании системы формирования пучка, в частности организацию рабочего места исследователя и сотрудника медицинского ускорителя, а также указываются правовые нормы трудового законодательства. Помимо этого, определяются опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть при работе исследователя и эксплуатации разработанной модели, основные источники загрязнения окружающей среды и способы снижения их воздействия. Помимо выше перечисленных пунктов проводится анализ возможных ЧС и плана действий в случае их возникновения.

5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.2.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства

Устанавливаются следующие основные гигиенические нормативы облучения на территории Российской Федерации в результате использования источников ионизирующего излучения для работников:

- 1) средняя годовая эффективная доза равна 0,02 Зв или эффективная доза за период трудовой деятельности (50 лет) – 1 Зв;
- 2) допустимо облучение в годовой эффективной дозе до 0,05 Зв при условии, что средняя годовая эффективная доза, исчисленная за пять последовательных лет, не превысит 0,02 Зв.

При обращении с источниками ионизирующего излучения организации обязаны:

1) осуществлять систематический производственный контроль за радиационной обстановкой на всей территории организации, а также за выбросом и сбросом радиоактивных веществ;

2) проводить контроль и учет индивидуальных доз облучения работников;

3) проводить подготовку и аттестацию лиц, постоянно или временно выполняющих работы с источниками ионизирующего излучения, по вопросам обеспечения радиационной безопасности;

4) организовывать проведение предварительных (при поступлении на работу) и периодических медицинских осмотров работников (персонала);

Социальные гарантии за повышенный риск и возмещения вреда, причиненного радиационным воздействием здоровью лиц, привлекаемых для ликвидации последствий радиационной аварии, устанавливаются законодательством РФ [18].

К работе на ускорителе допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, отнесенные приказом руководителя организации к категории персонала группы А, прошедшие обучение по правилам работы на ускорителе и по радиационной безопасности, прошедшие инструктаж по радиационной безопасности.

Женщины должны освобождаться от работы на ускорителе, связанной с воздействием ионизирующих излучений, на весь период беременности и грудного вскармливания ребенка.

Запрещается размещение ускорителей и РУ УЭЛ в жилых зданиях и детских учреждениях. РМУ УЭЛ должен располагаться в отдельном здании, отдельном крыле здания или пристройке. Радиационная защита ускорителя или РИ УЭЛ должна обеспечивать выполнение требований НРБ-99/2009.

Запрещается использование помещений ускорителя для других целей.

Помещения ускорителя, технологически связанные с его эксплуатацией, следует размещать в едином комплексе. В учреждении, где ускоритель используется в стационарных условиях, должны быть предусмотрены следующие помещения:

- 1) рабочая камера
- 2) процедурная для ускорителей медицинского назначения, площадью не менее 40 м².
- 3) пультовая, площадью не менее 15 м².
- 4) вспомогательные помещения, необходимые для обеспечения работы ускорителя и осуществления технологического процесса.

При размещении ускорителей медицинского назначения (РМУ УЭЛ) дополнительно должны выполняться следующие требования:

- 1) вход в процедурную должен быть организован через пультовую в поле зрения оператора;
- 2) на входе в процедурную должна быть установлена дверь. Если дверь является частью стационарной радиационной защиты и нуждается в электроприводе, то в случае отключения питающей сети должна быть предусмотрена возможность в любой момент открыть дверь вручную изнутри и снаружи;
- 3) включение пучка излучения должно быть возможно только из комнаты управления при закрытой двери в процедурную;
- 4) на РМУ УЭЛ должно быть предусмотрено двухстороннее переговорное устройство для связи с пациентом во время облучения;
- 5) для контроля положения пациента во время лечения в процедурной должна быть предусмотрена система видеонаблюдения, позволяющая оператору следить за пациентом с пульта управления облучением при любом положении радиационной головки и стола для пациента;
- 6) в процедурной должно быть предусмотрено искусственное освещение пониженного уровня в пределах 5 – 20 лк для работы с применением оптических центраторов;

7) в процедурной должно быть предусмотрено аварийное освещение от автономного источника электропитания [19].

5.2.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны инженера

Рабочие места с ПЭВМ в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ.

Рабочий стул должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680 – 800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм [20].

Модульными размерами рабочей поверхности стола для ПЭВМ, на основании которых должны рассчитываться конструктивные размеры, следует считать: ширину 800, 1000, 1200 и 1400 мм, глубину 800 и 1000 мм при нерегулируемой его высоте, равной 725 мм [20].

Рабочий стол должен иметь 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 [20].

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 – 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов [20].

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы [20].

5.3. Профессиональная социальная безопасность

Определим опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть при проведении моделирования, а также при эксплуатации разработанной системы формирования электронного пучка. Результаты приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ		Нормативные документы
	Моделирование	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата.	+	+	1. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».
2. Превышение уровня шума.	-	+	2. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы.
3. Отсутствие или недостаток естественного света.	+	+	3. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.
4. Электромагнитное излучение.	+	+	4. ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля (с Изменением N 1).
5. Психофизиологические факторы	+	+	5. СанПиН 2.2.2/2.4.2732–10 "Изменения № 3 к СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы"

Продолжение таблицы 19

6. Повышенный уровень ионизирующего излучения.	-	+	6. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009. 7. СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010).
7. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.	+	+	8. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

5.3.1. Анализ вредных и опасных факторов, возникающих при эксплуатации разработанной модели. Обоснование мероприятий по защите инженера от их действия

Эксплуатация разработанной системы формирования медицинского электронного пучка напрямую связана с работой электронного ускорителя. Ниже будут приведены опасные и вредные факторы, которые возникают при работе такого ускорителя, а также мероприятия по снижению воздействия этих факторов на сотрудников.

При работе линейного медицинского ускорителя могут возникнуть следующие вредные и опасные факторы:

- 1) Изменение показателей микроклимата в рабочем помещении.

Может возникнуть из-за долгосрочного пребывания персонала в помещении с установкой и нагрева токоведущих частей установки.

Неподходящие условия микроклимата могут привести к снижению работоспособности и концентрации работников, способствуют заболеваемости. Кроме того, присутствие озона, образующегося в результате радиолиза, неблагоприятно для организма в силу его высокой окислительной способности.

Эффективными мероприятиями по оздоровлению воздушной среды можно считать правильную организацию вентиляции, отопления и кондиционирования помещения. В зале с рабочей установкой допускается естественная вентиляция помещения, так как объем зала превышает 40 м³.

Удаление озона из рабочей зоны также осуществляется естественным путем – потоками воздуха [21].

2) Превышение уровня шума в рабочем помещении.

При работе установки источниками постоянного шума являются подключенные насосы для охлаждения установки, также устройства для регулировки положения головки ускорителя.

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает утомляемость и способен привести к ошибкам в ходе выполнения работ. Кратковременные интенсивные шумы могут привести к механическим повреждениям органов слуха и других внутренних органов.

В соответствии с санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.562-96 шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки при проведении научных исследований не должен превышать максимальный уровень в 50 дБ.

Наиболее эффективной мерой снижения шума при работе с установкой является удаление рабочей зоны от насосов, производящих постоянный шум и от ускорителя, являющегося причиной кратковременных интенсивных звуковых импульсов на комфортное для инженера расстояние [22].

3) Недостаточная освещенность рабочего места.

В рабочем помещении естественный свет освещает не все пространство, так как часть пространства может быть загорожена стеллажами с оборудованием и самой установкой. Недостаточная освещенность или наоборот, слишком яркий свет и блики снижают работоспособность работника, ухудшают способности различать детали и снижают концентрацию [23].

Для компенсации недостатка естественного освещения в рабочем помещении, а также для создания достаточной освещенности необходимо создать систему комбинированного освещения, являющегося сочетанием общего и местного таким образом, чтобы освещенность рабочей зоны составляла не менее 500 лк, что соответствует нормам освещенности согласно СП 52.13330.2011, СНИП 23-05-95 [23].

4) Электромагнитное излучение.

Электромагнитное излучение - распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. Для работы ускорителя используется высоковольтный источник энергии. Источник полностью экранирован. Предельно допустимая величина электромагнитного воздействия от источника напряжения на человека составляет менее 0,2 мкТл. Это значение входит в допустимый порог строгих санитарных норм электромагнитного излучения [24].

5) Психофизиологические факторы.

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

Трудовая деятельность работников непромышленной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента и т.д. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает функциональных на активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развития утомления, переутомления, стрессу.

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [20].

б) Воздействие ионизирующего излучения.

При работе ускорителя генерируется мощное электронное и рентгеновское излучение. Под действием ионизирующего излучения может

происходить множество нарушений работы организма, вплоть до нарушения свертываемости крови, снижения иммунитета и т.д.

Наиболее эффективной мерой защиты является защита расстоянием – удаление рабочей зоны достаточно далеко от ускорителя. Система формирования электронного пучка располагается в головке ускорителя, корпус которой состоит из материала с высокой плотностью (свинец, вольфрам или их сплав). Корпус защищает персонал и пациентов от рассеянного электронного и рентгеновского излучения. Управление ускорителем осуществляется из пультовой, стены помещения, в котором находится ускоритель, обладают большой толщиной и состоят преимущественно из тяжелого бетона. [25, 26].

7) Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов и других органов, в результате чего в них возникают функциональные расстройства.

Электролитическое действие тока характеризуется разложением крови и других органических жидкостей, что вызывает нарушения их физико-химического состава.

Механическое действие тока проявляется в повреждениях (разрыве, расслоении и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта.

Биологическое действие тока на живую ткань выражается в опасном возбуждении клеток и тканей организма, сопровождающемся непроизвольными судорожными сокращениями мышц. В результате такого возбуждения может возникнуть нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения.

В рабочем помещении осуществляется проведение работ с источниками переменного высокого напряжения. Помещение для работы с высоковольтными

источниками должно соответствовать требованиям безопасности: в нем не должны присутствовать токопроводящие полы и источники токопроводящей пыли; относительная влажность не должна превышать 75%, а температура – 35 °С; также необходимо исключить возможность одновременного прикосновения к металлическим заземленным элементам и металлическим корпусом [27].

В этих целях требуется не только обеспечить надлежащую изоляцию токоведущих частей, но и защитить их от разрушения изоляции, заключив проводку в защитную оболочку и закрепив вне путей прохождения персонала [27].

5.3.2. Анализ вредных и опасных факторов, возникающих при работе исследователя. Обоснование мероприятий по защите инженера от их действия

Были определены следующие опасные и вредные факторы при работе исследователя:

1) Изменение показателей микроклимата в рабочем помещении.

В помещении с компьютером применяется естественная вентиляция через окна и двери. Объем помещения составляет 48 м³, при этом не происходит выделения вредных веществ. Благоприятные условия микроклимата, приведенные в таблице 20, поддерживаются с помощью системы центрального отопления [21].

Таблица 20 – Благоприятные условия микроклимата

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

2) Превышение уровня шума в рабочем помещении.

Используемые при создании симуляции ПЭВМ являются малозумящими. В помещении с ПЭВМ отсутствуют источники шума выше 50

дБ, поэтому, согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96 дополнительные меры по шумоизоляции не требуются [22].

3) Недостаточная освещенность рабочего места.

Стол вместе с расположенной ПЭВМ располагается возле окна, свет падает с правой стороны, что позволяет достаточным образом освещать рабочее пространство лишь в дневное время.

Для компенсации недостатка естественного освещения в рабочем помещении, а также для создания достаточной освещенности необходимо создать систему комбинированного освещения, являющегося сочетанием общего и местного таким образом, чтобы освещенность рабочей зоны составляла не менее 500 лк, что соответствует нормам освещенности согласно СП 52.13330.2011, СНИП 23-05-95. [23]

4) Электромагнитное излучение.

Экран и системный блок ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна соответствовать значениям в таблице 21.

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы.

Таблица 21 – Допустимые уровни параметров электромагнитного излучения

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряженность электромагнитного поля	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

а) увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

б) применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты [24].

б) Психофизиологические факторы.

При работе исследователь испытывает нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки). Деятельность исследователя относится к непроизводственной сфере, категория работ связана с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест. В результате этого у исследователя развивается стресс, переутомление, а это приводит к снижению функциональной активности нервной системы и понижению эффективности труда.

В качестве мероприятий по снижению воздействия на исследователя нервно-психических перегрузок рекомендуется установить правильный режим труда и отдыха.

7) Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.

Питание ПЭВМ осуществляется посредством подключения его к сети переменного напряжения амплитудой 220 В.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

а) при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;

б) при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);

в) при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

г) при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

а) обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;

б) применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;

в) использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения (ГОСТ Р 12.1.019-2017);

г) использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

5.4. Экологическая безопасность

Под действием ионизирующего излучения, которое генерирует ускоритель, происходит радиолиз воздуха. В результате него образуются токсические вещества, которые загрязняют атмосферу и представляют опасность для человека, например, озон (O_3 , ПДК = 0,1 мг/м³), двуокись азота (NO_2 , ПДК = 2,0 мг/м³), окись углерода (CO , ПДК = 30 мг/м³), стирол (C_8H_8 , ПДК = 5,0 мг/м³), малеиновый ангидрид ($C_4H_2O_3$, ПДК = 1,0 мг/м³), фталевый ангидрид ($C_8H_4O_3$, ПДК = 1,0 мг/м³).

Для уменьшения концентрации токсических веществ в воздухе рассчитывают и устанавливают специальную вентиляцию с адсорбирующими фильтрами [3].

При разработке технического решения образуется только бытовой мусор. При работе ускорителя, каких-либо связанных с разработанной моделью отходов не образуется. Наибольший вред от ускорителя в работе – потребление электроэнергии. Также его производство и утилизация составляют серьезную проблему.

При производстве ПЭВМ и других устройств используются тяжелые, щелочноземельные металлы, ртуть, пластик и стекло, что без должной утилизации по окончании службы попадает в природу и остается в не переработанном виде от века до полутора тысяч лет.

Снижение уровня загрязнения окружающей среды возможно за счёт более эффективного и экономного использования электроэнергии. Это использование более экономичного оборудования, а также эффективного

режима загрузки этого оборудования. Сюда также включается и соблюдение производственной дисциплины в рамках правильного использования электроэнергии.

Необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять системы с малым энергопотреблением, ответственно относиться к утилизации различных устройств, т.к. они могут разлагаться в окружающей среде от десятков до сотен лет [30].

5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.5.1. Анализ типичной ЧС при проведении исследования

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка, сложившаяся на определенной территории в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

При проведении исследования наиболее вероятной ЧС является пожар. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера.

К причинам неэлектрического характера относятся халатное и неосторожное обращение с огнём (курение, оставление без присмотра нагревательных приборов).

К причинам электрического характера относятся:

- 1) короткое замыкание;
- 2) перегрузка проводов;
- 3) искрение;
- 4) статическое электричество.

Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции.

Причины возникновения короткого замыкания:

- 1) ошибки при проектировании;
- 2) старение изоляции;
- 3) увлажнение изоляции;
- 4) механические перегрузки.

Пожарная опасность при перегрузках – чрезмерное нагревание отдельных элементов, которое может происходить при ошибках проектирования в случае длительного прохождения тока, превышающего номинальное значение [28, 29].

5.5.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и порядок действий в случае возникновения ЧС

Пожарная безопасность помещения должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Пожарная защита должна обеспечиваться применением средств пожаротушения, а также применением автоматических установок пожарной сигнализации.

Должны быть приняты следующие меры противопожарной безопасности:

- 1) обеспечение эффективного удаления дыма, т.к. в помещениях, имеющих оргтехнику, содержится большое количество пластиковых веществ, выделяющих при горении летучие ядовитые вещества и едкий дым;
- 2) обеспечение правильных путей эвакуации;
- 3) наличие огнетушителей и пожарной сигнализации;
- 4) соблюдение всех противопожарных требований к системам отопления и кондиционирования воздуха.

Рабочее помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре. Выведение людей из зоны пожара должно производиться по плану эвакуации. План эвакуации представляет собой заранее разработанную схему, на которой указаны пути эвакуации, эвакуационные и аварийные выходы, установлены правила поведения людей, порядок и последовательность действий в условиях чрезвычайной ситуации.

Существует порядок действий и правила поведения в случае возникновения пожара:

- 1) Незамедлительно позвонить в аварийную службу или МЧС (112);
- 2) Поставить в известность руководство (дежурного);
- 3) По возможности принять меры для эвакуации людей и меры для тушения пожара [28, 29].

5.6. Выводы по разделу

Рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Определение и анализ вредных факторов производства позволяют предупредить производственный травматизм и улучшить условия труда, что в свою очередь способствует увеличению эффективности и качеству выполняемой работы.

Приведенные методы уменьшения загрязнения окружающей среды могут быть использованы для минимизации вреда от использования разработки как для человека, так и для природы.

В заключительной части раздела «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» проведен анализ вероятной чрезвычайной ситуации (ЧС), которая может возникнуть на рабочем месте при проведении исследований, помимо этого приведены мероприятия по предотвращению ЧС и порядок действий во время возникновения ЧС.

Заключение

При изучении литературы была найдена информация о типовой схеме основных дозиметрически важных элементов системы формирования пучка. На основе этой информации была разработана модель системы формирования электронного пучка и проведены расчеты в программе PCLab. Помимо расчета полностью всей системы, был произведен поэтапный расчет спектра электронов за каждым элементом системы формирования. Полученные результаты использовались для оценки влияния каждого элемента системы на среднюю и наиболее вероятную энергию спектра электронов терапевтического пучка. В результате оценки было выяснено, что наибольший вклад в изменение спектра электронов вносит первая рассеивающая фольга, т.к. она состоит из материала с высокими плотностью и порядковым номером Z (вольфрам). Элементы, состоящие из алюминия, оказывают минимальное влияние на спектр электронов. Кроме первой рассеивающей фольги, заметный вклад в изменение спектра вносят титановая фольга вакуумной камеры, свинцовый коллиматор и аппликатор. Уменьшение энергии спектра на титановой фольге, как и на вольфраме, связано с высокими плотностью и Z материала, на свинцовом коллиматоре и аппликаторе уменьшение связано с рассеиванием электронного пучка в большом объеме воздуха, который содержат данные элементы системы формирования.

Спектры электронов после прохождения всей системы формирования пучка содержат много электронов с низкими энергиями, которые увеличивают дозу на поверхности фантома. Электроны с наиболее вероятной энергией имеют меньший угол рассеяния, проходят глубже в водный фантом и формируют дозу на глубине.

Одной из задач при написании модели системы формирования было создание системой равномерного распределения плотности электронов на поверхности водного фантома. Полученное распределение плотности электронов на поверхности фантома с площадью облучения $10 \times 10 \text{ см}^2$

соответствует равномерному распределению из этого был сделан вывод, что параметры рассеивающих фольг были выбраны правильно.

Для оценки соответствия формируемого пучка в модели экспериментальному пучку линейного медицинского ускорителя, на основе рассчитанных результатов строилось распределение ПГД в водном фантоме. Построенное распределение сравнивалось с экспериментальным распределением ПГД электронов с номинальной энергией 12 МэВ и площадью облучения $10 \times 10 \text{ см}^2$ ускорителя SIEMENS ONCOR. При сравнении стало ясно, что формируемое моделью распределение частично не соответствует экспериментальному и для исправления была осуществлена корректировка начальной энергии электронного пучка. В результате подбора энергий и сравнения распределений ПГД была определена энергия необходимая для соответствия экспериментальным данным – 12,4 МэВ. Это означает, что облучение с «номинальной» энергией 12 МэВ, соответствует начальной энергии электронного пучка 12,4 МэВ.

Дополнительно в работе был проведен расчет плоского источника и расчеты с ним, которые показали значительное уменьшение времени расчета. Рассматривалось два этапа размещения плоского источника в геометрии системы формирования. При расчете с ПИ 1-го этапа вычисление проводилось быстрее чем при полном расчете всей системы без ПИ в 1,8 раза, при расчете с ПИ 2-го этапа в 40 раз. Стоит отметить, что с ПИ 1-го этапа имеется возможность расчета модели для разных площадей облучения и расстояния до водного фантома, ПИ 2-го этапа может использоваться для модели лишь с определенными параметрами.

Параметры и материал типовых элементов системы формирования терапевтического пучка ускорителя являются коммерческой тайной – в открытом доступе такую информацию найти невозможно. Данная модель была написана на основе информации об элементах и их характеристик из различных источников. Большая часть информации была заимствована из иностранной литературы, являющейся наиболее актуальной на данный момент.

Список использованных источников

1. Клёнов, Г.И. Адронная лучевая терапия: история, статус, перспективы / Г.И. Клёнов, В.С. Хорошков // Успехи физических наук. – 2016. – т. 186, № 8. – С. 891-911.
2. Podgorsak, E.V. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students / E.V. Podgorsak. – Vienna: IAEA, 2005. – p. 658.
3. Беспалов, В.И. Надзор и контроль в сфере безопасности. Радиационная защита: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / В.И. Беспалов. – 4-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 507 с. – Серия: Университеты России.
4. Brady, L.W. Technical Basis of Radiation Therapy. Practical Clinical Applications / L.W. Brady, H.-P. Heilmann, M. Molls, S.H. Levitt, J.A. Purdy, C.A. Perez, S. Vijayakumar. – Stürtz GmbH, Würzburg: Springer, 2006. – 858 p.
5. Khan, F.M. Khan's The Physics of Radiation Therapy / F.M. Khan, J.P. Gibbons. – Fifth edition. – Philadelphia: LWW, 2014. – 584 p.
6. Karzmark, CJ. Medical Electron Accelerators / CJ. Karzmark, CS. Numan, E. Tanabe. – NY: McGraw-Hill, 1993. – 336 p.
7. Беспалов, В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом / В.И. Беспалов. – 4-е изд., исправ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 369 с.: ил.
8. Bovi, M. Absolute air-kerma measurement in a synchrotron radiation beam by ionization free-air chamber [Электронный ресурс] / M. Bovi, R.F. Laitano, M. Pimpinella, M.P. Toni, F. Arfelli, K. Casarin, D. Dreossi, R.H. Menk, E. Quai, G. Tromba, A. Vascotto. – Электрон. текстовые дан. – Proceedings of the Absorbed Dose and Air Kerma Primary Standards Workshop. – Paris, 2007. – Режим доступа: http://www.nucleide.org/ADAKPS_WS/Session%20G%20-%20Special%20Standards/G4_Pa-Toni.pdf, свободный.
9. Кашковский, В.В. Специальный физический практикум / В.В. Кашковский. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 404 с.

10. Bielajew, A.F. Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport / A.F. Bielajew. – Michigan.: The University of Michigan, 2016. – 346 p.
11. Кольчужкин, А.М. Введение в теорию прохождения частиц через вещество / А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин. – М.: Атомиздат, 1978. – 256 с.
12. Беспалов, В.И. «Компьютерная лаборатория» (КЛ/PCLab). Описание программы. Руководство по работе с программой. Версия 9.10. / В.И. Беспалов. – Томск: ТПУ, ИЯТШ, ОЯТЦ, 2018. – 128 с.
13. Милойчикова, И.А. Формирование дозных полей индивидуальной конфигурации клинических пучков электронов с помощью полимерных изделий, изготовленных посредством технологий трехмерной печати: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника / Милойчикова И.А.; Потылицын А.П. – Томск, 2018. – 155 с.
14. LeBlanc, J.D. Design of electron dual foil scattering systems for Elekta Infinity radiotherapy accelerators / J.D. LeBlanc. – LSU, 2012. – 207 p.
15. Algorithms (Smooth). The Lowess and Loess method [Электронный ресурс] / OriginLab Corporation. – Режим доступа: <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Smooth-Algorithm>, свободный.
16. Mora, G.M. Monte Carlo simulation of a typical ^{60}Co therapy source / G.M. Mora, A. Maio, D.W.O. Rogers // Medical Physics. – 1999. – Vol. 26, No. 11. – p. 2494-2502.
17. Видяев, И.Г. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницына. – Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
18. О радиационной безопасности населения (с изменениями на 19 июля 2011 года) [Текст]: Федеральный закон от 09 янв. 1996 г. № 3-ФЗ // Собрание законодательства. – 1996. – № 3, (15 янв.). – ст. 141.

19. Об утверждении СанПиН 2.6.1.2573–2010 (вместе с "СанПиН 2.6.1.2573-10. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. Санитарные правила и нормативы") [Текст]: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 18 янв. 2010 г. № 3 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2010. – № 17, (26 апр.).
20. Об утверждении СанПиН 2.2.2/2.4.2732–10 "Изменения № 3 к СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" [Текст]: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 03 сен. 2010 г. № 116 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2010. – № 46, (15 ноя.).
21. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Текст]: Взамен СН микроклимата производственных помещений, утвержденных Минздравом СССР от 31.03.86., N 4088-86.; введ. 1996-10-01. – М.: Минздрав России, 2001. – 20 с.
22. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы [Текст]: Взамен СН № 3223-85, СН № 3077-84, "Гигиенических рекомендаций по установлению уровней шума на рабочих местах с учетом напряженности и тяжести труда" N 2411-81.; введ. 1996-10-31. – М.: Минздрав России, 1997.
23. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [Текст]: Введ. 2017-05-08. – М.: Стандартинформ, 2018. – 121 с.
24. ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля (с Изменением N 1) [Текст]: Введ. 1986-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.

25. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [Текст]: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
26. СП. 2.6.1.2612–10. [Текст]: Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.
27. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. [Текст]: Введ. 2019-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
28. 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. – 17 с.
29. ГОСТ Р 22.0.02–2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения [Текст]. – Взамен ГОСТ Р 22.0.02.–94; введ. 2016-09-12. – М.: Стандартинформ, 2016. – 8 с.
30. ГОСТ Р 52106-2003. Ресурсосбережение. Общие положения. – Введ. 2003-07-03. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 8 с.

Приложение А

Таблица А.1 – Матрица SWOT

	Сильные стороны технического исполнения:	Слабые стороны технического исполнения:
	<p>С1. Простая установка ПО на ПЭВМ.</p> <p>С2. Простой для использования интерфейс.</p> <p>С3. Наличие инструкции и примеров для обучения использованию функционала программы.</p> <p>С4. Настроенные режимы расчетов для выполнения конкретных задач.</p> <p>С5. Графическое отображение траекторий частиц, геометрии моделирования, некоторых результатов.</p> <p>С6. Начальные параметры модели задаются в файле и для изменения параметров требуют изменения лишь нескольких цифр.</p> <p>С7. По окончании расчета создается файл, содержащий в себе подробный отчет о результатах.</p>	<p>Сл1. Ограниченное количество режимов расчета.</p> <p>Сл2. Не полное отображение интерфейса на ПЭВМ с соотношением сторон монитора не 4:3.</p> <p>Сл3. Получение большей точности требует увеличения длительности расчетов.</p> <p>Сл4. Не все результаты расчета имеют графическое отображение в программе. Для некоторых требуется самостоятельное построение на основе данных из файла результатов.</p>

Продолжение таблицы А.1

<p>Возможности: В1. Расчет системы формирования пучка при ее различных параметрах и элементах. В2. Расчет биологической защиты персонала для ускорителя. В3. Оценка уже существующих систем и моделей с возможностью их дополнения. В4. Появление новых режимов и обновление программного кода.</p>	<p>В1С3С6. Наличие инструкции и настроенного файла входных данных позволяет легко и быстро менять параметры модели. В2С3С4С6. Готовые режимы для расчета, инструкция и правильно сделанный файл данных позволят выполнять расчеты в области физики защиты. В3С3С4С5С6С7. Инструкция, готовые примеры и настроенные режимы, на основе которых можно будет построить файл входных модели. Для удобства, часть результатов имеет графическое отображение в программе в реальном времени, за более подробными результатами всегда можно будет обратиться к файлу результатов расчета.</p>	<p>В4Сл1Сл2Сл4. Дальнейшее обновление программы, оптимизация ее под широкоформатные мониторы, добавление новых режимов для увеличения спектра выполняемых задач сделают ее еще более удобной и эффективной для моделирования.</p>
<p>Угрозы: У1. Редкое обновление ПО. У2. Наличие зарубежных конкурентов в области моделирования.</p>	<p>У1С4. Несмотря на редкое обновление программа может выполнять достаточно широкий спектр задач и имеет большие перспективы развития. У2С1С2С3. По сравнению с зарубежными конкурентами программа имеет более простую установку и интерфейс. В дополнение к этому она имеет встроенную в функционал программы инструкцию и примеры для каждого режима расчета.</p>	<p>У1Сл2Сл3. Введение поддержки широкоформатных мониторов и оптимизация кода, для лучшего использования мощностей ПЭВМ. У2Сл3. Использование более мощной ПЭВМ для уменьшения времени расчета.</p>

Таблица А.2 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожсi}$, чел-дни					
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4	-
2. Календарное планирование выполнения ВКР	1	3	3	4	1,8	3,4	0,9	1,7	1	3
3. Планирование моделирования	-	6	-	10	-	7,6	-	7,6	-	11
4. Подготовка файлов данных	-	5	-	7	-	5,8	-	5,8	-	9
5. Проведение моделирования	-	15	-	30	-	21	-	21	-	31
6. Обработка полученных данных	1	10	2	15	1,4	12	0,7	6	1	9
7. Оценка правильности полученных результатов	1	5	2	10	1,4	7	0,7	3,5	1	5
8. Составление пояснительной записки	-	10	-	15	-	12	-	12	-	18
Итого:	5	54	11	91	7,4	68,8	5,1	57,6	7	85

Примечание: Исп. 1 – руководитель, Исп. 2 – инженер.