

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

Институт: Физико-технический
Направление подготовки: Ядерные физика и технологии
Кафедра: Прикладной физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Формирование поперечных профилей электронных пучков

УДК 539.1.06

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4А	Красных Ангелина Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ НИ ТПУ	Стучебров С.Г.	К.ф.-М.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская М.В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ	Гоголева Т.С.	К.ф.-М.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Прикладная физика	Вагнер А.Р.	К.ф.-М.Н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиозоологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

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

Институт: Физико-технический

Направление подготовки: (специальность): Ядерные физика и технологии

Кафедра: Прикладной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4A	Красных Ангелина Александровна

Тема работы:

Формирование поперечных профилей электронных пучков.

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

6.06.2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

Результатом работы будет способ формирования поперечных профилей электронных пучков, осуществляемый при помощи специально изготовленных, методами быстрого прототипирования, фильтрующих элементов, позволяющих коллимировать, фильтровать электронные пучки и корректировать их профиль интенсивности, формы и размеры которых рассчитываются при помощи, специально разработанной для данных целей модели реального электронного пучка, основанной на применении метода Монте-Карло.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Обзор и анализ литературы по данной проблематике; создание программной модели электронного пучка, соответствующей реальному пучку микротрона ТПУ с энергией 6,1 МэВ; расчет при помощи модели форм и размеров фильтрующих элементов и их изготовление; проведение испытаний фильтрующих элементов на реальном пучке, сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования, формирование выводов.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М. В.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Иностранный язык	Ермакова Я.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Моделирование электронного пучка	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ НИ ТПУ	Стучебров С. Г.	к. ф.-м. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4А	Красных Ангелина Александровна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 90 с., 28 рис., 14 табл., 34 источника, 2 прил.

Ключевые слова: фильтрующий элемент, профиль электронного пучка, микротрон, АБС пластик.

Объектом исследования является методика формирования поперечных профилей электронного пучка.

Цель работы – разработка методики формирования поперечных профилей электронных пучков путем создания фильтрующих элементов методами аддитивных технологий.

В процессе исследования проводились: изучение технической литературы, моделирование источника излучения, подбор формы и размеров фильтрующего элемента, печать исследуемого образца и создание его модели, получение и обработка теоретических и экспериментальных данных, корректировка модели, сравнение и анализ результатов.

В результате исследования был разработан способ формирования поперечных профилей электронных пучков, осуществляемый при помощи специально изготовленных, методами быстрого прототипирования, фильтрующих элементов, позволяющих фильтровать электронные пучки, корректировать их профиль интенсивности и составление указаний по реализации предлагаемой методики.

Область применения: в медицине для формирования клинического пучка, в промышленности для формирования пучка определенной формы.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в возможности минимизировать затраты на приобретение коллимационных и фильтрующих систем для ускорителей электронов, сделать данные системы определенными для решения конкретной задачи, сократить время на изготовление таких изделий

Следующим этапом работы станет создание более сложной коллимационной и фильтрующей системы для апробации данного метода.

Магистерская диссертация выполнена с помощью текстового редактора Microsoft Office Word 2010, редактор таблиц Microsoft Office Excel 2010, редактор графиков Origin 8.0.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

ускорители электронов: класс технических устройств, предназначенных для вывода пучков заряженных частиц, ускоряющихся под действием электромагнитных полей.

трехмерная печать: послойное создание физического объекта по цифровой модели.

метод Монте-Карло: группа численных методов, которые основаны на получении большого числа реализаций случайного процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи.

АБС пластик: термопластическая ударопрочная техническая смола, которая является сополимером акрилонитрил-бутадиен-стирола.

электронный пучок: поток электронов, которые движутся по близким траекториям в одном направлении.

Используемые в работе обозначения и сокращения:

АБС – акрилонитрил-бутадиен-стирол,

3D – трехмерный,

НИР – научно- исследовательская работа.

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ Р 1.5 – 2012 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.

2. ГОСТ 2.104 – 2006 Единая система конструкторской документации. Основные надписи.

3. ГОСТ 2.105 – 95 Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.

4. ГОСТ 2.106 – 96 Единая система конструкторской документации. Текстовые документы.

5. ГОСТ 2.301 – 68 Единая система конструкторской документации. Форматы.

6. ГОСТ 3.1105 – 2011 Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов общего назначения.

7. ГОСТ 3.1404 – 86 Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов на технологические процессы и операции обработки резанием.

8. ГОСТ 3.1407 – 86 Единая система технологической документации. Формы и требования к заполнению и оформлению документов на технологические процессы (операции), специализированные по методам сборки.

9. ГОСТ 7.0.12 – 2011 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Сокращения русских слов и словосочетаний в библиографическом описании произведений печати.

10. ГОСТ 7.32 – 2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

11. ГОСТ 8.417 – 2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.

Оглавление

Введение.....	10
1. Литературный обзор	13
1.1 Электронные пучки.....	13
1.1.1 Источники электронов	13
1.1.2 Взаимодействие электронов с веществом и биологической тканью	23
1.1.3 Применение электронных пучков.....	24
1.2 Аддитивные технологии	30
1.2.1 Методы 3D-печати.....	31
1.2.2 Метод послойного наплавления.....	32
1.2.3 Пластики	35
2. Материалы и методы	38
2.1 Метод Монте-Карло	38
2.2 Программа «Компьютерная лаборатория»	40
2.3 Микротрон ТПУ	41
2.4 Устройство для трехмерной печати.....	42
3. Теоретическое и экспериментальное исследование.....	44
3.1 Моделирование	44
3.1.1 Модель источника излучения.....	44
3.1.2 Фильтрующий элемент.....	45
3.1.3 Моделирование сформированного пучка.....	46
3.2 Эксперимент	48
3.2.1 Экспериментальные данные	48
3.2.2 Анализ результатов и корректировка модели.....	52
3.2.3 Методика формирования определенного профиля электронного пучка	56
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	58
4.1 Предпроектный анализ.....	58
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	59
4.1.2 SWOT-анализ.....	60
4.2 Планирование управления научно-техническим проектом	61
4.2.1 Иерархическая структура работ проекта.....	61
4.2.2 Контрольные события проекта.....	62

4.2.3	План проекта	62
4.3	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	64
4.3.1	Расчет материальных затрат	65
4.3.2	Расчёт амортизации оборудования для экспериментальных работ	65
4.3.3	Затраты на оплату труда исполнителей НТИ	67
4.3.4	Отчисления во внебюджетные фонды.....	69
4.3.5	Накладные расходы	69
4.4	Формирование бюджета затрат научно-технического исследования (НТИ)	69
4.5	Организационная структура проекта	70
4.6	Матрица ответственности	71
4.7	Определение ресурсной эффективности исследования.....	72
5.	Социальная ответственность	Ошибка! Закладка не определена.
5.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного воздействия и устранению их влияния на работающих	Ошибка! Закладка не определена.
5.2.1	Требования к ПЭВМ и организация работы	Ошибка! Закладка не определена.
5.2.2	Радиационная безопасность.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.3	Электробезопасность	Ошибка! Закладка не определена.
5.4	Пожарная и взрывная безопасность	Ошибка! Закладка не определена.
	Заключение	76
	Список публикаций студента.....	78
	Список использованных источников	Ошибка! Закладка не определена.
	Приложение А	Ошибка! Закладка не определена.
	Приложение Б.....	Ошибка! Закладка не определена.

Введение

Электронные пучки нашли широкое применение в современной медицине [1-4], где с их помощью решается широкий спектр радиотерапевтических задач. Одно из наиболее эффективных и перспективных направлений использования пучков в медицине является интраоперационная лучевая терапия электронами различной энергии. Так как данная процедура представляет собой непосредственное подведение высокой однократной дозы к патологическому очагу или на «ложе» удаленной опухоли, к форме полей и их характеристикам предъявляются очень высокие требования.

Сегодня на практике для формирования терапевтического пучка электронов применяется система фильтрующих элементов и коллиматоров. На первом фильтре за счет многократного рассеяния тонкий электронный пучок превращается в расходящийся. Вторая фольга используется для создания однородного профиля электронного пучка. Коллимационная система ускорителя включает в себя набор коллиматоров, где первичный и вторичный коллиматоры используются для создания широкого расходящегося пучка, а мультилепестковый коллиматор – для создания конечного поля заданной формы и дозного распределения. Также для формирования профиля используют такие приспособления, как клинья, блоки и так далее. Такой подход позволяет формировать необходимые терапевтические поля. Однако он существенно усложняет и удорожает процесс разработки клинического ускорителя для доставки терапевтического электронного пучка.

Новые решения, обеспечивающие высокую точностью изготовления фильтров, быстроту их производства и снижения стоимости, позволят повысить эффективность методов, использующих электронные пучки. Таким решением может быть технология изготовления образцов методом трехмерной печати [5-6]. Данная технология позволит сократить временные затраты до нескольких часов, в сравнении с несколькими днями, для стандартных методов создания алюминиевых выравнивающих фильтров,

индивидуальных свинцовых блоков и коллиматоров заданной формы. Также немаловажным преимуществом предложенного метода является его относительно невысокая стоимость, по предварительным оценкам себестоимость создания одного изделия будет составлять порядка одной тысячи рублей, тогда как изготовление стандартной металлической продукции составляет порядка десяти тысяч рублей.

В связи с тем, что форма создаваемых коллимирующих и фильтрующих систем может быть рассчитана с учетом непосредственной задачи, метод может обеспечить быстрое и точное формирование произвольного профиля пучка. Возможность создания фильтров сложной формы позволяет единомоментно формировать поле облучения с неоднородным распределением дозы в объеме мишени. Также метод может позволить добиться повышения точности доставки дозы непосредственно к патологическому очагу и исключить критические органы из поля облучения.

Наиболее распространенным материалом в трехмерной печати является АБС пластик в силу его дешевизны и простоты технологии наплавления [7]. Однако при расчетах формы фильтра может возникнуть ряд особенностей, которые необходимо учитывать.

Таким образом, целью данной магистерской диссертации стала разработка методики формирования поперечных профилей электронных пучков путем создания фильтрующих элементов методами аддитивных технологий.

Для достижения поставленной цели были выполнены такие задачи:

- изучение технической литературы,
- моделирование источника излучения,
- подбор формы и размеров фильтрующего элемента,
- печать исследуемого образца и создание его модели,
- получение и обработка теоретических и экспериментальных данных,
- корректировка модели,

- сравнение и анализ результатов,
- составление указаний по реализации предлагаемой методики.

1. Литературный обзор

1.1 Электронные пучки

Электронный пучок представляет собой поток электронов, которые перемещаются в веществе в одном направлении по близким траекториям, размеры которого, в поперечной плоскости значительно меньше, чем в направлении движения. Электронный пучок можно рассматривать как совокупность одноимённых заряженных частиц, внутри которой имеется пространственный заряд электронов, создающий собственное электрическое поле, так и, в связи с тем, что частицы движутся по близким траекториям, в виде линейных токов, создающих собственное магнитное поле. Пучок электронов в электрическом поле создаёт силу Кулона, которая стремится расширить пучок (при энергиях электронов в несколько кэВ, токах в несколько десятых мА), при этом сила Лоренца, которая стремится сжать пучок (при энергиях электронов порядка МэВ), возникает за счет действия магнитного поля [8].

1.1.1 Источники электронов

Основными источниками электронов являются ускорители заряженных частиц различных видов, в основе действия, которых лежит эмиссия электронов с поверхности вещества.

Эмиссия электронов – это процесс испускания электронов в вакуум или какую-либо другую среду под действием различных внешних воздействий, путем передачи твердому телу дополнительной энергии – работы выхода, которая определяется разностью полной энергии потенциального барьера и энергией уровня Ферми для металлов; сумма внешней работы выхода и энергетической полуширины запрещенной зоны для полупроводников.

Существует несколько видов эмиссии электронов, такие как термоэлектронная эмиссия, происходит за счет нагревания тел (эмиттеров); автоэлектронная эмиссия – за счет воздействия на твердое тело сильного электрического поля напряженностью 10^7 - 10^8 В/м; фотоэлектронная

эмиссия – путем воздействия на вещество интенсивными источниками света (например мощными импульсными лазерами), за счет явления внешнего фотоэффекта [9].

Ускорители заряженных частиц представляют собой класс технических устройств, предназначенных для вывода пучков заряженных частиц, ускоряющихся под действием электромагнитных полей. Все ускорители можно разделить на две основные группы – линейные, в которых частицы проходят через ускоряющие промежутки однократно, и циклические, в которых пучки движутся по определенным замкнутым кривым.

Первые линейные ускорители или ускорительные трубки начали применяться еще в 30-х годах прошлого столетия. В таком устройстве ускорение электронов происходило за счет воздействия на пучок постоянным электрическим полем высокого напряжения. В качестве источника напряжения обычно используют генератор Ван-дер-Граафа или высоковольтные трансформаторы с умножителем. Конструкцию таких трансформаторов можно представить в следующем виде: последовательно включены несколько высоковольтных ртутных выпрямителей таким образом, что происходит стекание заряда одного знака в землю, а другого сосредоточивается на верхних пластинах конденсаторов, две цепочки которых подсоединены к обоим концам вторичной высоковольтной обмотки трансформатора. Данная схема позволяет получать электронные пучки интенсивностью порядка десятков микроампер, при этом энергии частиц составляют порядка 2 МэВ.

В послевоенные годы, в связи с развитием высокочастотных генераторов переменного тока, для питания электронных ускорителей стали использовать переменное напряжение, схема такого прибора была сконструирована норвежским физиком Рольфом Видероз еще в 1924 году, которая представлена на рисунке 1.1.

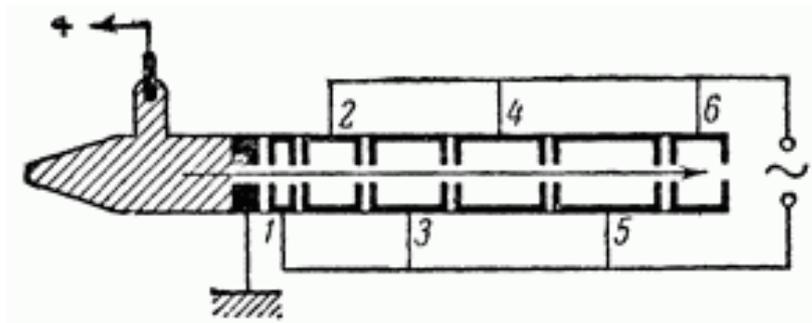


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема электронного ускорителя Видероз

Из схемы видно, что цилиндрические электроды в устройстве включены таким образом, что все нечетные элементы (на рисунке 1 обозначены цифрами 1, 3, 5) и четные (на рисунке 1 обозначены цифрами 2, 4, 6 соответственно) соединены параллельно между собой и подключены к полюсам высокочастотного генератора. Электроны, образующиеся в левой части устройства, попадая в осевой канал трубки, многократно ускоряются переменным напряжением в зазорах между этими электродами, при этом внутри самих электродов электроны движутся по инерции, то есть без ускорения.

Начиная двигаться внутри прибора, электроны приобретают начальное ускорение за счет поля электрода 1, в тот момент этот электрод имеет максимальный положительный потенциал, частицы проходят, путь внутри электрода 1 за тот промежуток времени (половину периода изменения напряжения), за который положительный потенциал переходит на электрод 2. В пространстве между первым и вторым электродами электроны вновь ускоряются и с полученной скоростью продолжают перемещаться внутри второго электрода. Так как время, за которое положительный потенциал переходит на следующий электрод, не изменяется необходимо увеличить путь прохождения частиц в соответствии с приобретенной ими скоростью в зазоре. Поэтому создается необходимость точного расчета длины каждого цилиндрического электрода для конструирования ускорителя Видероз [10].

В современных линейных ускорителях импульс течет по тому же волноводу, в котором осуществляется ускорение частиц. Для генерации

импульсов переменного напряжения используют магнетроны и клистроны, которые создают сотни раз в секунду кратковременные импульсы, продолжительностью несколько микросекунд с мощностью порядка миллионов ватт. В полый металлической трубе происходит распространение такого импульса, который можно представить в виде движения электромагнитных волн, характеристики которых зависят от геометрических и физических свойств волновода.

При этом необходимо, чтобы в волноводах электрический вектор волны, направленный вдоль направления перемещения пучка, имел составляющую отличную от нуля. Данное условие выполняется, если стенки волновода изготовлены из проводящих металлов, при этом, чем больше их электрическая проводимость, тем медленнее энергия электромагнитного импульса рассеивается в стенках. Поэтому для изготовления волноводов используют металлы, такие как, медь и серебро.

Если стенки волновода абсолютно гладкие, то импульс электромагнитного поля распространяется быстрее, чем ускоряемые частицы. В связи с этим импульс должен иметь скорость распространения в любом месте волновода точно согласованную со скоростью электронов в том же месте. Для выполнения этого условия внутри волновода размещаются диафрагмы или полые цилиндры, выполненные из металла. Проектирование любого линейного ускорителя осуществляется путем выбора основной волны, несущей достаточное количество энергии, и установка соответствия скорости, с которой происходит распространение этой волны, со скоростью электронов.

Линейные ускорители электронов способны генерировать пучки электронов и пучки тормозного излучения с энергиями от десятков до тысяч МэВ, благодаря чему и получили широкое распространение в медицине и промышленности.

Существует несколько видов циклических ускорителей заряженных частиц, такие как циклотрон, микротрон, синхротрон и бетатрон. Конструкционная особенность таких установок заключается в том, что

частицы, двигаясь по замкнутой кривой, под действием магнитного поля, несколько раз проходят одни и те же ускоряющие промежутки, за счет чего для вывода ускоренного пучка определенной энергии такие устройства будут иметь значительно меньшие размеры, нежели линейные ускорители.

Первый циклический ускоритель – циклотрон, получивший широкое распространение, был сконструирован в 1932 году американским физиком Эрнестом Лоуренсом. Особенность циклотрона состоит в том, что ионы, за счет воздействия на них полем мощного магнита, двигаются по виткам спирали. Причем напряжение на магнитах постоянно, составляет порядка десятка киловольт и изменяет свое направление на противоположное каждый раз при прохождении частицей полуокружности. Такой ускоритель малоэффективен для ускорения электронов, так как для его стабильной работы необходимо согласовывать период проводимого напряжения и период обращения иона, который прямо пропорционален массе частицы, что становится невозможным осуществлять при достижении энергии электрона порядка сотней кэВ. Это можно объяснить также тем, что масса протона составляет 1836 масс электрона, таким образом если электрон и протон обладают одинаковой скоростью, то по определению кинетической энергии, энергия протона во столько же раз больше энергии электрона. Таким образом, в циклотроне, с помощью которого можно вывести пучок протонов с энергиями частиц до 300 – 400 МэВ, электроны могут быть получены с энергиями до 0,1 – 0,2 МэВ.

Для ускорения электронов наиболее часто применяют установки, называемые бетатроны, которые основаны использовании явления электромагнитной индукции. Впервые идея создания такой установки была высказана еще Видероз в 1927 году, впоследствии ее разработал Макс Штейнбек в 1935 году, детальное теоретическое исследование провел Я.П. Терлецкий в 1940 году, после чего разработал и воплотил в жизнь конструкцию первого бетатрона американский физик Д.В Керст в 1941 году.

Источником электронов в таких установках является катод, из которого под действием высоких температур вылетают частицы. Его располагают внутри кольцевой ускорительной камеры, где поддерживают достаточно высокий вакуум. Такая камера в свою очередь расположена между полюсами электромагнита, который, в отличие от циклотрона, питается переменным током с частотами около 60 – 600 Гц.

За счет данной конструкции в межполюсном пространстве происходит изменение магнитного потока и в камере наблюдается индуцирование замкнутых линий электрического поля, как следствие происходит циркуляция напряженности данного поля, и в таком случае индуцированная электродвижущая сила ξ , которая может быть определена из закона Фарадея:

$$\xi = \oint E_l dl = -\frac{1}{c} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

В ускорительной камере электроны ускоряются электрическим полем, которое принуждает их около 10^5 раз пролететь вдоль одной из замкнутых силовых линий данного электрического поля прежде, чем направление индуцированного поля станет противоположным. В течение прохождения одной группы электронов полного ускорительного процесса, ток, который питает электромагнит, претерпевает изменения на четверть периода.

Для обеспечения корректной работы бетатрона необходимо соблюдать условие стабильности орбиты электронов, а именно неизменность ее радиуса. Данное условие может соблюдаться исключительно в том случае, если на орбите напряженность магнитного поля ровно в два раза больше средней напряженности магнитного поля внутри контура орбиты.

При таком движении электрона могут произойти два случая отклонений его от стабильной орбиты: отклонение наружу, после чего возврат на стабильную орбиту осуществляется отклонением внутрь, возврат происходит вследствие инерции движения. С учетом данных вероятностей полюса электромагнита бетатрона имеют специальную форму, которая была

получена в ходе расчетов и экспериментов. Схема такого исполнения полюса электромагнита в сечении, представлена на рисунке 1.2.

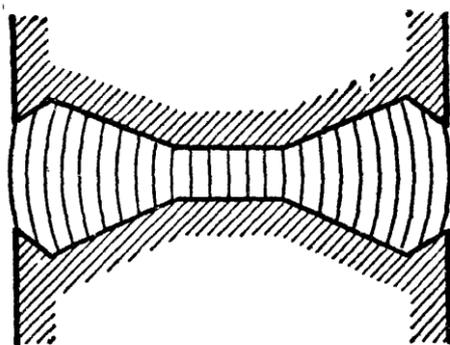


Рисунок 1.2 – Поле электромагнита бетатрона

Вывод со стабильной орбиты ускоренных электронов производится за счет специального импульса напряжения, который подается в обмотку электромагнита.

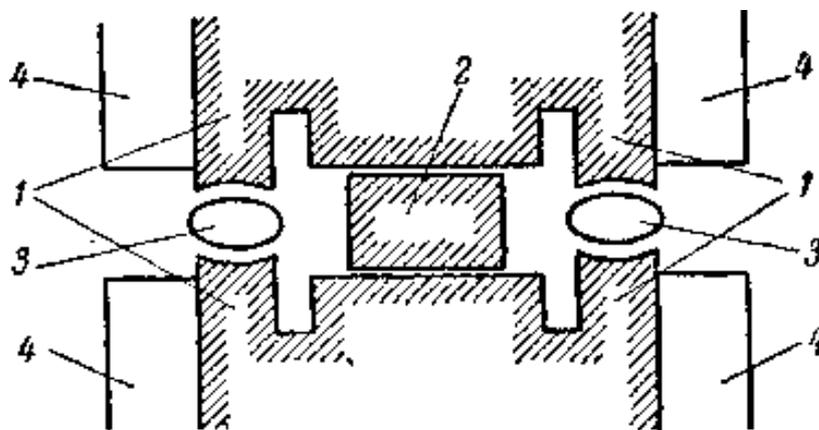
В процессе развития бетатронов Д.Д. Иваненко и И.Я. Померанчук провели расчеты, исходя из которых, было замечено, что при достижении энергии частиц около 500 МэВ потери энергии на излучение достигает энергии, которую приобретают электроны за счет ускорения в камере. Также такие потери будут приводить к сокращению радиуса стабильной орбиты, что приведет к нарушению нормальной работы аппарата. Делая вывод из выше сказанного можно понять, что максимальные энергии ускоренных в бетатроне электронов не будут превышать значений более 500 МэВ.

По аналогии с линейными ускорителями бетатрон может генерировать электронные пучки (энергии до 500 МэВ) и пучки тормозного излучения, которые при достаточно высоких энергиях электронов испускаются по направлению их движения.

Так как энергии ускоренных электронов в бетатроне не превышают десятых долей ГэВ был разработан аппарат совмещающий принципиальные особенности бетатрона и циклотрона, впоследствии получивший название синхротрон. Начало ускорительного цикла в такой установке происходит по принципу работы бетатрона, а именно с использованием индуцированного

переменным магнитным потоком электрического поля. После того, как электроны приобретают энергию порядка двух мега электрон-вольт, происходит автоматическое переключение бетатронного режима на циклотронный, то есть ускорение происходит за счет электрического поля, создающегося высокочастотным генератором.

Конструкция синхротрона показана на рисунке 1.3 и включает в себя ускорительную камеру, которая по форме соответствует камере бетатрона, где поддерживается достаточно высокий вакуум. Кроме того, по аналогии с бетатроном, она помещена между кольцевыми полюсными наконечниками электромагнита, питается который, в свою очередь, переменным током. Внутри камеры помещены два электрода, которые находятся на небольшом расстоянии друг от друга, к которым подается напряжение от высокочастотного генератора. В каждую вторую часть цикла, а именно в тот момент, когда электроны попадают в пространство между такими электродами, происходит ускорение по принципу работы циклотрона.



1 – полюсные наконечники; 2 – сердечник; 3 – ускорительная камера;
4 – обмотки электромагнита

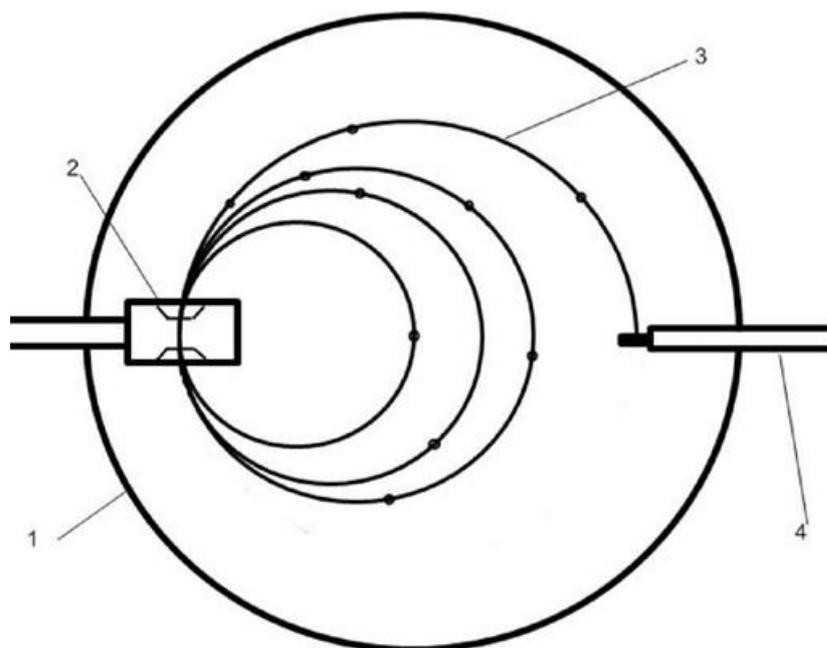
Рисунок 1.3 – Схема электромагнита синхротрона

Теоретические расчеты по применению синхротронов были подробно проработаны группой физиков, во главе с Хилеем и Франком в 1946 – 1947 годах. В 1947 году началась детальная проработка конструкции синхротрона и испытание первых небольших моделей, в результате был сконструирован и

введен в эксплуатацию первый устойчивый синхротрон, который генерировал электронные пучки с энергией до 80 МэВ.

В данной диссертационной работе источником электронных пучков является микротрон ТПУ на энергии 6,1 МэВ, таким образом далее более подробно будет рассмотрено устройство и принцип действия такого ускорительного аппарата.

Принципиальной особенностью микротронов является то, что создаваемое внутри камеры магнитное поле не меняется со временем, при этом траектория электронов представляет собой плоскую спираль. Ускорение электронов происходит за счет воздействия на них высокочастотного электрического поля, которое создается в полом резонаторе. Устройство микротрона представлено на рисунке 1.4.



1 – вакуумная камера; 2 – резонатор; 3 – траектория электрона; 4 – мишень.

Рисунок 1.4 – Схема устройства микротрона

Из рисунка 1.4 можно наблюдать расположение электронных сгустков, которые одновременно находятся в ускорительной камере, с учетом того что магнитное поле имеет направление перпендикулярное к плоскости схемы. В пространстве между цилиндрическими полюсами электромагнита создается магнитное поле, при этом ускоряющий резонатор расположен вблизи края полюса.

Электрон в таком ускорителе движется по орбитам, которые имеют вид соприкасающихся между собой окружностей в точке расположения резонатора.

Внутри резонатора действует изменяющееся во времени ускоряющее напряжение по следующему закону:

$$V(t) = V_a \cdot \cos(\omega_{RT}t) \quad (1.2)$$

Резонансное ускорение – это процесс, в ходе которого, электроны при каждом прохождении резонатора имеют одинаковую фазу, а именно

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_s = \text{const} \quad (1.3)$$

При этом изменение энергии электрона после прохождения через резонатор можно представить в виде:

$$\Delta W = e \cdot V_a \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} \cdot \cos \varphi \quad (1.4)$$

где $\theta = \omega_{RT} \cdot \tau$ – угол пролета,

τ – время, за которое электрон пролетает ускоряющий зазор (резонатор),

φ – фаза.

В связи с тем, что функция $\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}}$ достаточно медленно меняется на интервале $0 < \theta < 40^\circ$, ее можно считать постоянной после первого прохождения резонатора:

$$\frac{\theta}{2} = \frac{1}{2} \omega_{RT} \frac{d}{c} = \frac{\pi d}{\lambda} = \pi l = \text{const}, \quad \text{где } \lambda \text{ – значение длины волны}$$

ускоряющего напряжения, d – ширина зазора, в котором происходит ускорение электронов.

Исходя из этого, запишем:

$$\Delta W = e \cdot V_a \frac{\sin \pi l}{\pi l} \cdot \cos \varphi_s = e \cdot V_s = \text{const}.$$

Где $V_s = V_a \frac{\sin \pi l}{\pi l} \cdot \cos \varphi_s$ – резонансное ускоряющее напряжение.

Таким образом, после прохождения ускоряющего зазора энергия электрона увеличивается на одинаковую величину, а значит и период обращения частицы по орбите увеличивается на одно и то же значение, а именно:

$$\Delta T = \frac{2\pi \cdot V_s}{cH} \quad (1.5)$$

То есть для стабильной работы микротрона должно выполняться условие:

$$\frac{2\pi \cdot V_s}{cH} = b \cdot T_{RF}, \text{ где } b \text{ – целое число, неравное нулю, } T_{RF} \text{ – неизменный}$$

во времени период ускоряющего поля [11].

Микротроны нашли широкое применение в медицине и промышленности, их применяют в качестве источников излучения для лучевой терапии, дефектоскопии, изготовления изотопов, обработка различных материалов и т.д. Более подробно применение электронных пучков будет рассмотрено в главе 1.1.3.

Для того, чтобы иметь представление о форме профиля электронного пучка, полученного в результате прохождения частиц через мишень, необходимо подробно рассмотреть особенности характера взаимодействия электронов с веществом.

1.1.2 Взаимодействие электронов с веществом и биологической тканью

Электрон представляет собой легкую отрицательно заряженную частицу, в связи с чем, при движении электрона в веществе при каждом его столкновении импульс, а также направление движения, претерпевают заметные изменения, при этом имеет место электромагнитное излучение электронов.

Взаимодействие электронов с веществом можно условно разделить на следующие типы:

- неупругое столкновение с атомными электронами среды, которое влечет за собой ионизацию или возбуждение атомов;

- неупругое столкновение с ядрами, которое сопровождается тормозным излучением;
- упругое столкновение с атомными электронами среды,
- упругое столкновение с ядрами [12].

Упругие столкновения приводят к отклонению электрона от его направления движения, при этом потери энергии минимальны.

Количественная характеристика энергии излучения, которая поглощается в единице массы вещества, называется поглощённая доза.

Потери энергий электронов, при их движении в веществе, могут быть как ионизационными, так и радиационными, при этом их зависимости от порядкового номера вещества и от энергии электронов имеют вид:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}} \sim Z^2 \cdot E_{e^-} \quad (1.6)$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз}} \sim Z \quad (1.7)$$

Из формул 1.6 и 1.7 можно сделать вывод, что с увеличением начальной энергии электронов возрастают радиационные потери, а также вводится понятие критической энергии, при которой радиационные потери равны ионизирующим.

Как было сказано ранее, траектория движения электронов в веществе представляет собой извилистую кривую, в связи с чем, вводится понятие эффективного пробега, который представляет собой минимальную толщину вещества, в которой энергия электрона полностью поглотится, данная характеристика определяется эмпирическим путем для каждого вещества в частности.

1.1.3 Применение электронных пучков

Так как в данной работе источником является микротрон, в данной главе будет описано применение электронных пучков, выводящихся именно из такой ускорительной установки.

Условно применение электронных пучков может быть разделено на две большие группы: применение в промышленных целях и медицинских.

В промышленных целях электронные пучки чаще применяются в качестве излучения для дефектоскопии, для дистанционного обнаружения веществ, в производстве некоторых изотопов и с целью радиационной обработки различных материалов, в том числе очистка отходящих газов промышленных предприятий, обработка отстоев городских отходов, обеззараживание сырья и продуктов, стерилизация медицинских изделий и препаратов. Также пучки электронов используются в связи с их термическим воздействием на материал, что приводит к изменению его структуры, а именно сварка, резка, поверхностная закалка, наплавка, вжигание [13]. Исходя из темы диссертационной работы, далее будет подробно описано применение электронных пучков в медицинских целях и их формирование.

В медицинских целях широкое распространение пучки электронов получили в качестве излучения для лучевой терапии поверхностных опухолей, а также неглубоко лежащих злокачественных образований. Ускорители электронов также могут использоваться в качестве источников характеристического и тормозного излучения для брахиотерапии [12].

Радиотерапия или лучевая терапия заключается в том, чтобы воздействием ионизирующего излучения производить разрушающее воздействие на пораженные клетки, таким образом, предотвращая возможное дальнейшее распространение злокачественных образований. При этом нормальные ткани подвергаются меньшему повреждению, нежели злокачественные опухоли. Однако нормальные ткани могут выдержать без повреждения лишь ограниченную дозу.

Поглощенная доза – это отношение средней энергии $d\bar{E}$, которую передает ионизирующее излучение веществу в единичном объеме, к элементарной массе вещества dm в данном объеме.

При проведении лучевой терапии необходимо обеспечивать такие условия чтобы, повреждения нормальных тканей, особенно критических

органов, сводились к минимуму. Для этого необходимо проводить детальное планирование каждого этапа лучевой терапии, тем самым обеспечивать максимально хорошую локализацию дозного поля.

Как уже было рассмотрено ранее, электроны, являющиеся легкими заряженными частицами, попадая в вещество, имеют скорости близкие к релятивистским, в связи с чем, доза является практически постоянной по всей длине пробега, при этом она резко падает только в конце пути. Рассмотрим взаимодействия электронов с АБС пластиком.

На рисунках 1.5 и 1.6 изображены распределения поглощенной дозы в вертикальной (на глубине 2 мм) и горизонтальной плоскостях при взаимодействии электронного пучка с энергией 6,1 МэВ с тестовым материалом, плотность которого 1,1 г/см³.

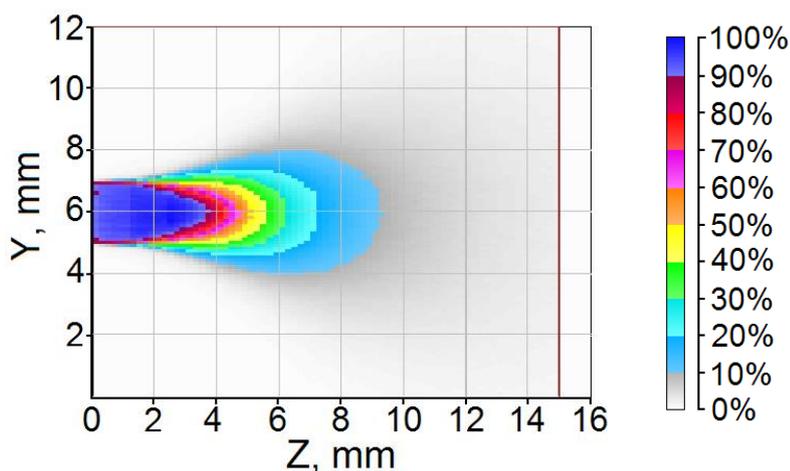


Рисунок 1.5 – Распределение электронных пучков с энергией 6,1 МэВ в горизонтальной плоскости

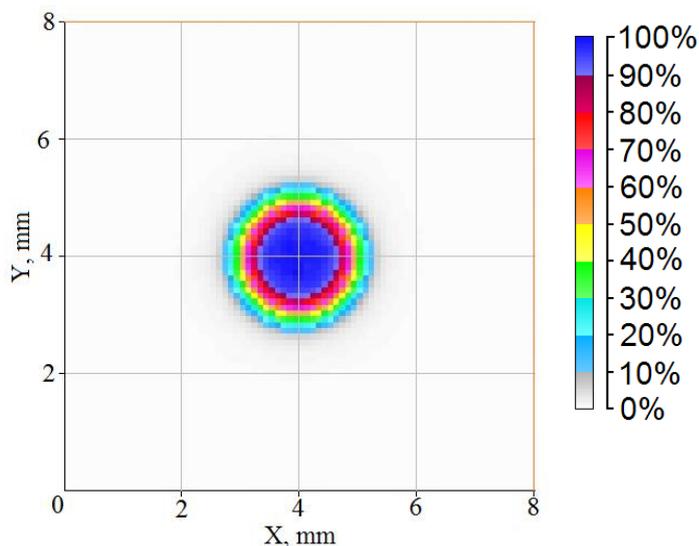


Рисунок 1.6 – Распределение электронных пучков с энергией 6,1 МэВ в вертикальной плоскости

Глубинные распределения поглощённых доз в материале плотностью 1.1 г/см³ изображены на рисунке 1.7, где дозы нормированы на 100 %.

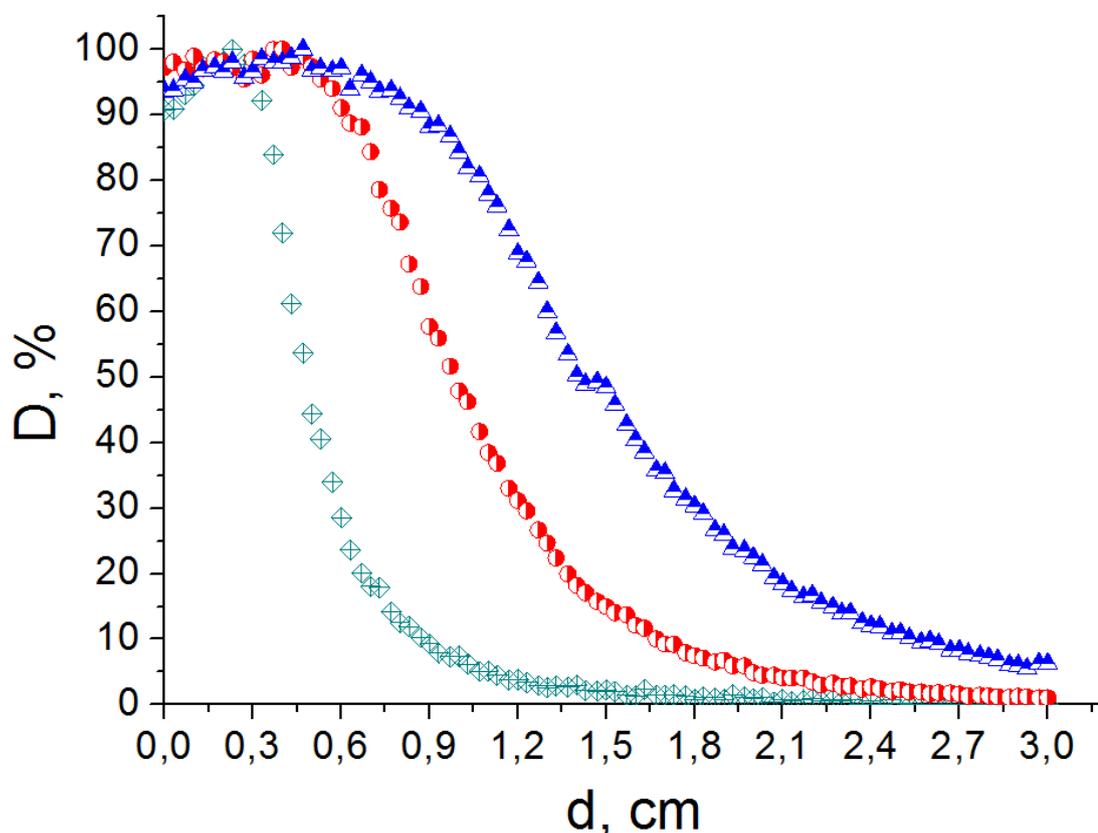


Рисунок 1.7 – Глубинные распределения поглощённых доз в материале плотностью 1.1 г/см³, где \diamond – электроны с энергией 6 МэВ; \bullet – электроны с энергией 12 МэВ; \blacktriangle – электроны с энергией 20 МэВ.

Энергии электронов соответствуют энергиям медицинского электронного пучка на ускорителе Elekta Synergy, который используется для лечения в Томском областном онкологическом диспансере.

Из рисунка 1.7 видно, что при увеличении энергии увеличивается глубина проникновения электронов в тестовый материал, плотность которого соответствует средней плотности кожи человека. Также происходит расхождения «пика» дозы, т.е. при энергии 20 МэВ максимальная доза сохраняется до глубины 10 мм, а при энергии 6 МэВ – до 5 мм.

Таким образом, к недостаткам электронной терапии относятся небольшая глубина проникновения, а также генерируется нежелательное тормозное излучение.

При описании биологических эффектов, которые возникают при воздействии ядерного излучения на органы и ткани, часто вводится понятие, такое как линейные потери энергий (ЛПЭ). В связи с тем, что зачастую злокачественные образования имеют слабое кровоснабжение, а как следствие они содержат клетки, в которых пониженное содержание кислорода (гипоксичные клетки), для их стерилизации требуется большая дозовая нагрузка. При этом с увеличением ЛПЭ сопротивление к излучению таких клеток уменьшается.

В связи с тем, что при прохождении электронов через вещество имеют место вторично рожденные электроны спектр ЛПЭ необходимо разделять на высокоэнергитичную и низкоэнергитичную компоненту и рассматривать эффекты от таких вкладов отдельно. При воздействии высокоэнергитичной составляющей на нормальные и зараженные клетки отклик практически не отличается, а при взаимодействии низкоэнергитичной компоненты здоровые клетки чувствительны менее чем раковые в 3-5 раз. В связи с чем, для повышения эффективности радиотерапии необходимо уменьшать высокоэнергитичный вклад, как следствие при проведении лучевой терапии более предпочтительно использовать электроны высокой энергии.

При планировании и проведении лучевой терапии необходимо проводить формирование электронных полей путем воздействия на пучок специальными диафрагмами, аппликаторами, коллиматорами и формирующими фильтрами.

Далее будет рассмотрено, как устроено формирование электронных полей медицинского микротрона на примере ускорительной установки «Микротрон-М» фирмы «АГАТ». В таблице 1.1 приведены основные технические параметры российского медицинского микротрона М22.

Таблица 1.1 – Российский медицинский микротрон M22

Число орбит	22
Максимальная энергия микротрона, МэВ	22
Магнитное поле, Тл	0,2
Диаметр магнита, м	1,27
Импульсная мощность СВЧ-генератора, МВт	1,6
Частота магнетрона, ГГц	2,8
Длительность импульса, мкс	3,0
Энергии электронов для лучевой терапии, МэВ	8, 12, 15
Максимальная мощность дозы электронов, Гр/с	0,083
Максимальная мощность дозы фотонов, Гр/с	0,05
Максимальная энергия фотонов, МэВ	20
Максимальный размер электронного поля в изоцентре, см ²	20x20
Максимальный размер фотонного поля в изоцентре, см ²	30x30

В состав терапевтической головки входят элементы для формирования поля электронов, при этом в данной установке используется двухфольговая система. Формирующие фильтры представляют собой графитовый и свинцовый диски, при этом графитовый также служит в качестве замедлителя электронов до необходимой энергии. После прохождения таких фольг электронный пучок с увеличенным углом расходимости, а также необходимой энергией частиц попадает в первичный коллиматор, после чего проходит выравнивающий и компенсационный фильтр и диафрагму. Далее готовый клинический пучок попадает в ионизационную камеру, с помощью которой определяется доза получаемая пациентом, а для определения пространственного распределения пучка используются система световой имитации полей и оптический дальномер. Таким образом, доставляющийся пациенту электронный пучок имеет одинаковую дозу по всему заданному пространственному распределению.

Таким образом, для медицинских целей разработано большое количество электронных ускорителей, в том числе микротронов, которые

используются для облучения раковых опухолей. За счет своей малой массы электроны позволяют доставлять максимальную дозу на определенную глубину, при этом максимум дозы меняется путем изменения энергии электронов. Каждый медицинский ускоритель в обязательном порядке оснащен сложной системой коллиматоров и различных фильтров, для выравнивания дозного поля [14].

1.2 Аддитивные технологии

Аддитивные технологии на сегодняшний день открывают новые возможности в науке, технике, творчестве, а также в повседневной жизни. Первая технология 3D печати, принадлежавшая компании Charles Hull, была разработана еще в 1984 году и названа стереолитография, после чего был создан первый промышленный 3D принтер. Компания 3D Systems работала над созданием модели 3D принтера для печати в домашних условиях и в 1988 году был создан прототип такой установки SLA – 250.

В 1988 году компания Scott Grump представила миру новый метод трехмерной печати – моделирование плавленными осаждениями. Следующий этап развития трехмерных технологий пришелся на 1991 год, когда компанией Helisys была разработана и выпущена на рынок технология для изготовления многослойных образцов, а уже в 1992 году компания DTM представляет первую систему селективного лазерного спаивания.

Совсем скоро, уже в 1993 году компания Solidscape запускает серийное производство трехмерных струйных принтеров, такие установки могут создавать маленькие детали с четкой поверхностью, важно отметить, что стоимость изделий достаточно низка.

В 2005 году компания Z Corp создала первый 3D принтер, печатающий цветные детали. На сегодняшний день 3D печать охватывает широкий спектр возможностей и сфер, который с каждым днем всё больше растёт [15].

1.2.1 Методы 3D-печати

Далее представлены основные методы трехмерной печати, существующие на сегодняшний день.

1. Фотополимерная технология: масочная стереолитография (SGC), стереолитография (SLA, SL), цифровая световая проекция (DLP).

Такой метод основан на применении полимеров, которые отвердевают под действием на них световых лучей, например, ультрафиолетовых. Данная технология печати обладает достаточно высокой разрешающей способностью, однако высокая стоимость исходного материала создает ограничение в использовании данного метода широким кругом потребителей этого рынка. Принцип действия метода заключается в том, что лазер или проектор, используя световые лучи, отверждает жидкий полимер, в котором находится платформа. Таким образом, формируется первый слой создаваемого объекта. После чего платформа переходит на позицию ниже, в связи с чем, полимер, находящийся в жидком состоянии, покрывает готовый слой. Данный процесс повторяется до тех пор, пока не получен необходимый образец.

2. Спекание порошков: выборочная лазерная плавка (SLM), выборочное лазерное спекание (SLS), выборочное тепловое спекание (SHS), прямое лазерное спекание металлов (DMLS), электронно-лучевая плавка (EMB, EBF3).

Принцип работы данной технологии состоит в том, что используя лазер или какой-либо источник тепла исходные материалы, находящиеся в рассыпчатом твердом состоянии спекаются. Преимуществом данного метода является то, что возможно печатать объекты без каких-либо поддерживающих структур, при этом несформированный в слой порошок является платформой для спекеного. Используя такую технологию, возможно, использовать неизрасходованный материал повторно, и в отличие от предыдущего метода заполнение материалом нового слоя происходит за счет перемещения специального ролика, который разравнивает порошок. Исходными материалами для печати могут быть различные порошки пластиков, металлов.

3. Добавление связующего материала в порошок: цветная струйная печать (CJP), струйная трехмерная печать (3DP).

В этой технологии для соединения материала используются не лучи лазера, а клей, который подается из головки в определенном количестве. Основным преимуществом такой технологии является создание разноцветных фигурок, за счет возможности параллельно примешивать краситель.

4. Послойное добавление материала: моделирование послойным наплавлением (FDM), многоструйное моделирование (MJM), изготовление методом ламинирования (LOM).

Принцип действия данной технологии заключается в том, что исходный материал добавляется там, где необходимо для создания объекта. Для изготовления методом ламинирования, в качестве материала может использоваться бумага, которая лист за листом кладется друг на друга, после чего ножом прорезается контур необходимой детали. Для моделирования методом послойного наплавления в качестве материалов могут использоваться различные расплавленные пластики, жидкий полимер, а также бетон.

На сегодняшний день технология послойного наплавления является самой доступной за счет невысокой стоимости устройств для печати, а также за счет доступности в использовании [16].

1.2.2 Метод послойного наплавления

Как уже было описано ранее при помощи технологии послойного наплавления трехмерные объекты создаются путем нанесения последовательных слоев исходного материала, в соответствии с необходимой формой объекта. Данный метод был разработан С. Скоттом Трапом в восьмидесятых годах прошлого столетия и приобрел коммерческое распространение в 1990 году.

Первым этапом производственного процесса является обработка трехмерной компьютерной модели объекта. Далее происходит деление данной модели на слои, а также ее ориентация максимально подходящим образом для

трехмерной печати. Существуют такие устройства, которые поддерживают использование разных материалов во время одной печати. Данная возможность является большим преимуществом, так как становится возможным печатать объекты из одного материала, а опоры из другого, что обеспечивает более легкое удаление поддерживающей структуры с готового изделия. Также данное свойство таких устройств позволяет создавать образцы с элементами различного цвета, за счет использования одинакового пластика разных цветов.

После создания модели, следующим этапом является работа экструдера. Экструдер представляет собой устройство, которое имеет следующие элементы:

- привод, который служит для подачи нити,
- нагревательный элемент, для плавки материала,
- сопло, устройство, которое осуществляет экструзию.

Принцип действия таких устройств заключается в том, что пластиковая нить с помощью привода подается в экструдер, после чего нагревательный элемент начинает нагревать сопло, которое расплавляет пластик и наносит материал на модель определенной формы. Для плавного нанесения материала необходимо создавать резкий градиент температур, что достигается путем охлаждения вентилятором верхней части сопла.

Перемещение экструдера происходит в горизонтальной и вертикальной плоскостях по траекториям, которые задает система автоматизированного проектирования. Создание объекта происходит послойно, снизу вверх. Наиболее популярными системами координат, которые применяются в таком методе, являются декартова система, которая имеет оси X , Y и Z и построена на прямоугольном пространстве, и цилиндрическая система координат, которая имеет оси ρ , ϕ и Z и используется «дельта-роботами».

Данная технология имеет существенные ограничения, в связи с тем, что создавать нависающие структуры возможно только при малых углах наклона, если же углы большие, то создается необходимость использовать

искусственные опоры, которые зачастую создаются в процессе печати и отделяются от готового изделия. На рисунке 1.8 приведен пример внешнего вида такого устройства.

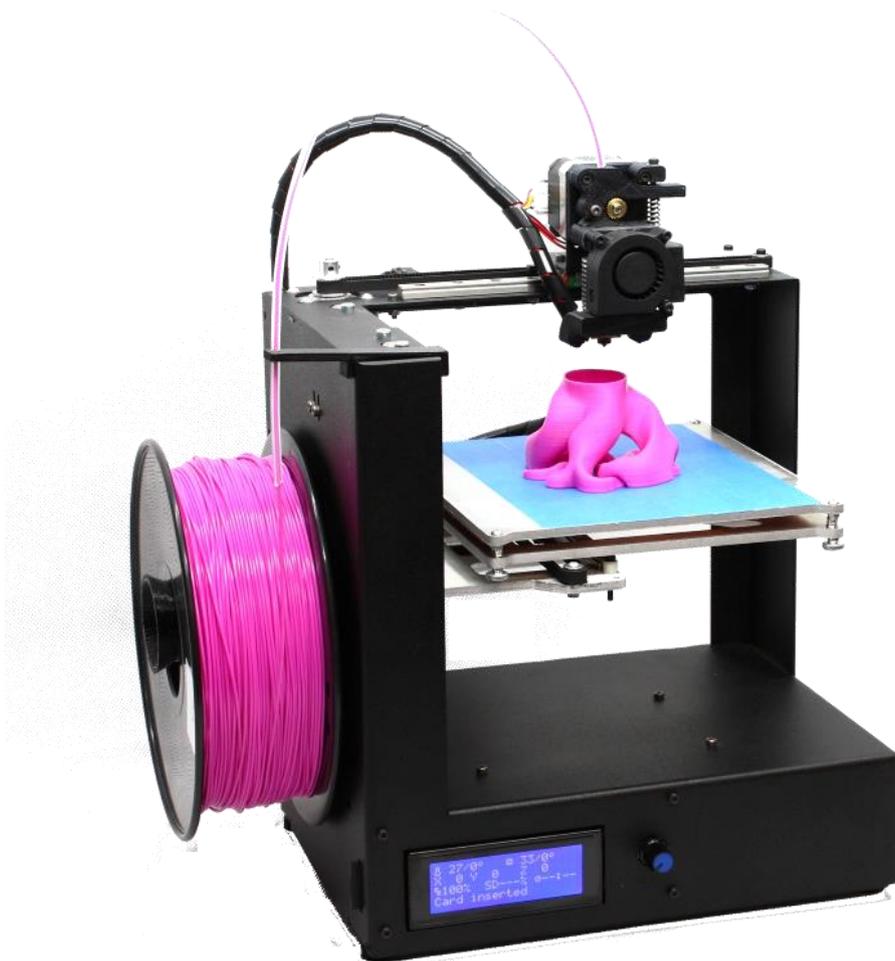


Рисунок 1.8 – Внешний вид 3D принтера MZ3D-256

Из рисунка 1.8 видно, что устройство имеет небольшие размеры и достаточно просто в использовании.

Для трехмерной печати методом послойного наплавления используются следующие материалы:

- различные термопластики, такие как АБС и ПЛА,
- поликарбонат,
- полистирол,
- полиамид,
- лигнин и многие другие.

Выбор материала необходимо проводить исходя из его физических свойств, таких как температура плавления, прочность и другие [17].

1.2.3 Пластики

В данной главе рассмотрены основные материалы для трехмерной печати: АБС и ПЛА пластики.

АБС пластик представляет собой термопластическую ударопрочную техническую смолу и является сополимером акрилонитрил-бутадиен-стирола. Это гибкий материал, который обычно имеет желтоватый оттенок, но может быть также прозрачным в некоторых модификациях. Такие материалы могут быть окрашены в разнообразные цвета.

Так как пластик содержит в себе как акрилонитрильные, так и бутадиеновые звенья со стиролом он сочетает в себе такие свойства, как ударопрочность и эластичность. Данный пластик обладает рядом уникальных физических свойств, за счет чего является одним из самых востребованных материалов для создания изделий различной формы. Чаще всего АБС пластик производится в виде гранул различных цветов. Также данный материал может служить основой для производства различных композитов, относящихся к классу особых полимеров.

Сополимер АБС пластика имеет условное обозначение, в которое включаются следующие численные показатели: показатель ударной вязкости, показатель текучести расплава и особые свойства материала обозначаются буквой. В качестве примера можно рассмотреть маркировку – АБС-0708Т. Данный материал является АБС пластиком, ударная вязкость которого равна 7 кДж/м², текучесть его расплава – 8 грамм на 10 минут, буквенное обозначение «Т» – повышенная теплостойкость.

Акрилонитрилбутадиенстирол получается сополимеризацией следующих мономеров:

– акрилонитрила, который представляет собой бесцветную жидкость, имеющую резкий запах;

- бутадиена, находящегося в газообразном состоянии, он бесцветен, обладает неприятным характерным запахом;
- стирола, который является бесцветной жидкостью, имеющей резкий запах.

АБС пластик является материалом с двухфазной системой: непрерывная и дисперсная фаза. Сополимер стирола и акрилонитрил, молекулярная масса которого равна 120 – 180, образуют в материале непрерывную фазу. Эта фаза имеет вид жесткой матрицы, где молекулы бутадиенстирольного каучука, имеющие размеры от 0,5 до 2 мкм, образуют дисперсную фазу. В общей массе пластика доля дисперсной фазы составляет около 15 – 30 %.

АБС-сополимер является инженерным пластиком и по многим показателям, таким как механическая прочность, жесткость и ударопрочность, существенно многие стирольные сополимеры. АБС пластик обладает свойством износостойкости, он может выдерживать кратковременные нагревы до 100°C. При постоянной эксплуатации максимальная температура воздействия на материал может варьироваться от 75 до 80°C [18].

Далее рассмотрены основные свойства ПЛА пластика.

ПЛА пластик представляет собой биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный алифатический полиэфир, структурной единицей которого является молочная кислота.

ПЛА пластик изготавливают из натуральных веществ, таких как кукуруза, сахарный тростник, картофельный или кукурузный крахмал, крупа из клубней маниока, соевый белок, целлюлоза.

После изготовления образца из PLA-пластика, его можно подвергать шлифованию и сверлению, также окрашивать акрилом. Основными недостатками такого материала являются: его хрупкость и недолговечность, материал может прослужить несколько лет, а может всего несколько месяцев [19].

Так как данная диссертационная работа направлена на изготовление фильтрующих элементов методом послойного наплавления более рационально использовать АБС пластик, нежели ПЛА, в связи с его более высокими характеристиками прочности и долговечности.

2. Материалы и методы

2.1 Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло является важнейшим методом, который используется для изучения процессов прохождения излучения через вещество, которые в свою очередь несут в себе информацию о структуре, свойстве и взаимодействии различных субатомных частиц. С помощью данного метода возможно производить расчет характеристик радиационных полей, при этом учитывая все особенности геометрии конкретной задачи и процессы взаимодействий частиц. Для моделирования прохождения излучения через вещество необходимо рассматривать большой спектр различных особенностей процесса, таких как электромагнитные взаимодействия частиц с атомами материала, а также необходимо моделировать траектории различных частиц в веществе и оценивать характеристики радиационных полей.

Метод Монте-Карло универсален и может применяться для решения ряда задач, не связанных с теорией переноса излучения, таких как вероятностные задачи теории надежности, массовое обслуживание, статистическая оценка качества различной продукции, биология, экономика, теория управления, решение уравнений математической физики.

Прохождение излучения через вещество – это пример случайного процесса, который состоит из некоторых отдельных случайных элементов, таких как длина пробега, вид взаимодействия, угол рассеяния. Компьютерное моделирование таких элементов может осуществляться за счет того, что через макроскопическое сечения взаимодействия можно выразить статистически устойчивую часть. В связи с тем, что направление движения и энергия частицы после столкновения с ядром или атомным электроном вещества случайны, энергетическое и угловое распределения определяются из соответствующих дифференциальных сечений, которые в свою очередь являются плотностями вероятности случайных величин.

Сечения взаимодействия при моделировании таких процессов являются плотностями вероятности случайных величин и могут быть использованы для моделирования полярного и азимутального углов, от которых напрямую зависит в каком направлении будет двигаться частица после взаимодействия.

В связи с тем, что энергия частицы после прямого столкновения связана с углом рассеяния, что известно из законов сохранения энергии и импульса для упругих столкновений, моделирование такого процесса происходит путем разыгрывания только одной из необходимых характеристик, а вторая в свою очередь определяется из кинематики рассеяния.

Траектория рассеянной частицы в веществе зависит от длины пробега, типа взаимодействия, нового направления движения после рассеяния, все эти характеристики представляют собой случайные элементы, плотности вероятности которых могут быть выражены через макроскопические сечения, в связи с чем если последовательно моделировать эти элементы можно получить траекторию частицы от ее рождения до полного поглощения. Если поглотитель не бесконечен, тогда необходимо учитывать, что траектория частицы может оборваться при ее вылете за пределы вещества.

Зачастую рассчитывая реальные задачи необходимо учитывать, что начальные энергии частиц и их направления движений также являются случайными величинами. В таком случае начинать моделировать траектории необходимо с определения начальных значений для данных параметров частицы, что можно осуществить только в случае если существует возможность определить плотности вероятностей начальных фазовых координат. В таком случае в качестве такой функции используется нормированная на единицу дифференциальная плотность источника.

Если частицы заряжены, такие как электроны, протоны, α -частицы и другие, тогда их распространение в веществе будет иметь ряд некоторых особенностей. Такие частицы при движении в веществе не поглощаются, но

теряют энергию претерпевая упругие и неупругие столкновения, до тех пор, пока скорость их движения не станет порядка тепловой, и в тот момент частицу считают остановившейся. Очень важную роль в прохождении заряженными частицами через вещество играет кулоновское взаимодействие, которое медленно убывает с расстоянием, в связи с чем после большинства столкновений частица меняет направление на малый угол и теряет некоторое количество своей энергии. Из выше сказанного следует, что количество соударений частиц с атомами вещества на ее траектории настолько велико, что даже если проводить их моделирование современными вычислительными машинами, данный процесс можно считать нецелесообразным, за исключением задач, в которых очень мала толщина поглотителя.

Рассмотренные выше проблемы возможно обойти, если использовать метод группировки столкновений. В данном методе прошедший частицей путь разбивается на некоторые отрезки, длина которых может быть, как случайной, так и детерминированной. На пути частицы ее фазовые координаты меняются случайным образом, и могут описываться уравнением Колмогорова-Чепмена. Рассчитанные координаты, являются начальными для розыгрыша конечных координат следующего отрезка. Данное моделирование повторяется до тех пор, пока энергия частиц не станет ниже некоторого порогового значения, тогда можно считать, что частица остановилась.

Моделирование таких процессов необходимо, в связи с тем, что пучки нейтронов, гамма-квантов, электронов и других частиц широко используются для решения теоретических и прикладных задач физики ядерных реакторов, защиты от излучений, дефектоскопии, радиационной физики, химии, радиобиологии и других наук, где часто требуется проведение расчетов радиационных полей, создаваемых различными источниками [20].

2.2 Программа «Компьютерная лаборатория»

Программа «Компьютерная лаборатория» предназначена для моделирования методом Монте-Карло процессов распространения электронов, позитронов, фотонов и протонов в веществе, визуализации

процессов распространения частиц на экране дисплея и получения численных результатов взаимодействия (например, альbedo, коэффициентов пропускания частиц, их энергетических и угловых распределений, распределения поглощенной энергии в веществе, дозы за защитой и т.д.). Программа позволяет проводить работы по моделированию полей излучения, при этом можно задавать тип излучения, вещество поглотителя и характеристики детектора.

В режиме Phantom рассчитывается трехмерное пространственное распределение поглощенной энергии в детекторе, представляющем собой прямоугольный параллелепипед, разбитый по X , Y , Z на элементарные воксели. Детектор может имитировать фантом, а геометрия, в которую он может быть помещен, может имитировать реальную геометрию дистанционной лучевой терапии на пучках фотонов, электронов и протонов. Возможен расчет пространственного распределения дозы и для других режимов облучения, не связанных с задачами лучевой терапии.

В режиме PHANTOM необходимые для расчета данные вводятся из файла данных. В двух маленьких окнах слева отображаются цвета частиц и минимальные энергии, до которых строятся их траектории. Программа предложит выбрать одну из 4-х геометрий, в которой будет изображена схема облучения. В это окно выводятся траектории частиц и результаты расчета в графическом виде. В двух маленьких окнах слева показаны цвета частиц и минимальные энергии, до которых строятся их траектории [21].

2.3 Микротрон ТПУ

В данной диссертационной работе источником излучения является микротрон НИИ Ядерной физики ТПУ, который был запущен 28 февраля 1965 году и являлся инжектором для синхротрона «Сириус».

В таблице 2.1 представлены основные технические характеристики микротрона НИИ Ядерной физики ТПУ.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики микротрона НИИ
Ядерной физики ТПУ

Максимальная энергия	6,1 МэВ
Длина сгустка	$\sigma \approx 2$ мм
Количество частиц в пучке	$N=10^8$
Количество частиц в импульсе	$n=10^4$
Период импульса	4~5 мкс
Частота импульса	1-8 Гц
Размер пучка на выходе	$\sigma \approx 2,5 \times 2,1$ мм ²
Расхождение пучка	$\sigma \approx 0,02 \times 0,02$ рад ²

Для моделирования источника электронов использовались параметры пучка, которые описаны ниже. Ускоритель имеет бериллиевое выходное окно диаметром 40 мм и генерирует электронный пучок со следующими характеристиками: размер пучка на выходе $\approx 2,0$ мм², расходимость пучка – 0,1 рад, энергия электронов – 6,1 МэВ [22].

2.4 Устройство для трехмерной печати

Для печати фильтрующих элементов использовался 3D принтер «UP! Plus 2».

Программное обеспечение для данного устройства имеет название «Up!» и поставляется бесплатно владельцем принтеров. Программа обладает простым интерфейсом. С помощью данного программного обеспечения пользователь может автоматически или вручную позиционировать модель на платформе, также имеется возможность автоматической генерировать поддерживающие структуры и масштабировать модели, также программа производит калибровку платформы.

Для данного устройства заявленная минимальная толщина наносимого слоя – 150 микрон, в ходе проведения работы были установлены образцы со слоями, толщина которых приблизительно равна 100 мкм. Данный принтер печатает со скоростью до 30 мм/сек.

В связи с тем, что кожух является съемной конструкцией, имеется возможность устанавливать его для работы с АБС и поддерживать повышенную фоновую температуру или снимать для работы с ПЛА пластиком, который требует быстрого охлаждения.

Технические характеристики 3D принтера «UP! Plus 2» представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики 3D принтера «UP! Plus 2»

Материал, который используется для печати изделий	АБС и ПЛА пластики
Размер рабочей зоны	ширина – 140 мм, глубина – 140 мм, высота – 135 мм
Толщины слоев	0,15/0,20/0,25/0,30/0,35/0,40 мм
Совместимость программного обеспечения с оперативной системой	Windows: Windows XP, Windows Vista, Windows 7/8; MAC
Габариты установки	ширина – 245 мм, глубина – 260 мм, высота – 350 мм
Вес устройства	5 кг
Требования по мощности питания	100-240 В, 50-60 Гц, 220 Вт
Особенности установки	Автокалибровка платформы

Для печати на данном устройстве используется стандартная нить пластика, имеющая диаметр 1,75 мм. [23]

3. Теоретическое и экспериментальное исследование

В рамках данной диссертационной работы было проведено моделирование взаимодействия электронного пучка с фильтрующим элементом из АБС пластика и получили экспериментальные данные того же процесса. После чего произвели анализ полученных расчетных и экспериментальных профилей электронного пучка, произвели корректировку модели, сформулировали выводы.

3.1 Моделирование

В ходе данной работы на первом этапе, используя программный пакет «Компьютерная лаборатория» была создана модель пучка и фильтрующего элемента. Для этого были выбраны его форма и размеры.

3.1.1 Модель источника излучения

Для подбора фильтрующего элемента был создана модель пучка электронов. На рисунке 3.1 представлена форма электронного пучка в поперечной плоскости на расстоянии 20 см от выходного окна и на рисунке 3.2 изображен профиль электронного пучка. Полученные в процессе моделирования дозы были нормированы на максимальное значение в слое.

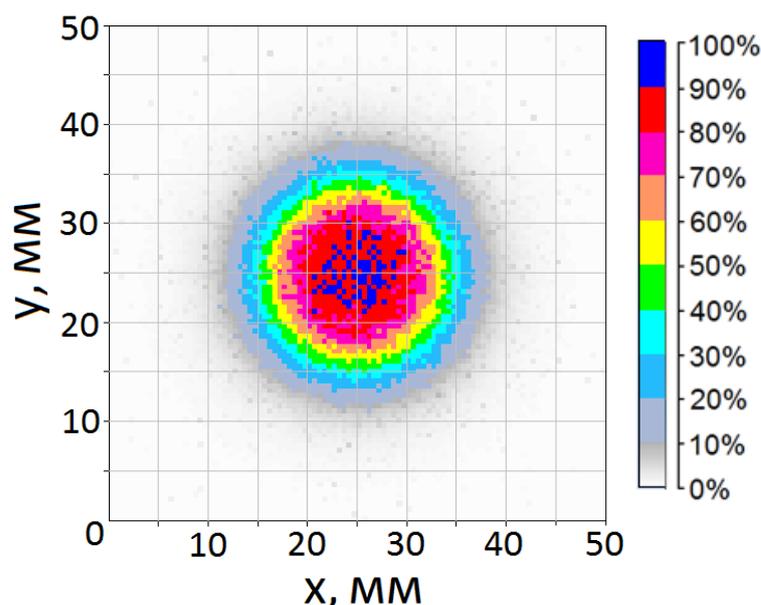


Рисунок 3.1 – Форма электронного пучка в поперечной плоскости

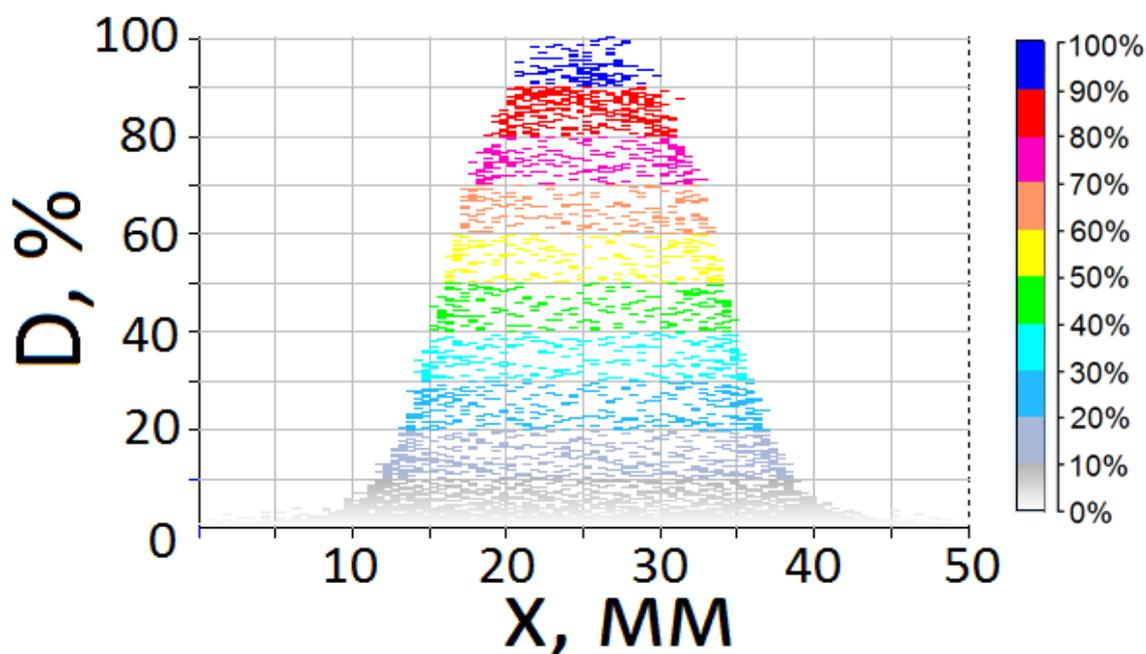


Рисунок 3.2 – Распределение электронов в плоскости оси пучка

Таким образом, на рисунках 3.1 и 3.2 представлены теоретически полученные форма и размеры пучка микротрона, на основе которого проводились дальнейшие расчеты.

3.1.2 Фильтрующий элемент

На сегодняшний день идея данной работы состоит в том, чтобы используя фильтры и коллимационные системы, изготовленные методом трехмерной печати, получать из любого произвольного пучка электронов клинический пучок. Для этого необходимо методом подбора определить размеры фильтрующего элемента так, чтобы некоторый диаметр пучка имел определенную постоянную интенсивность.

Из рисунков 3.1 и 3.2 были определены разные диаметры и толщины фильтрующего элемента, которые представлены на рисунке 3.3 в миллиметрах.

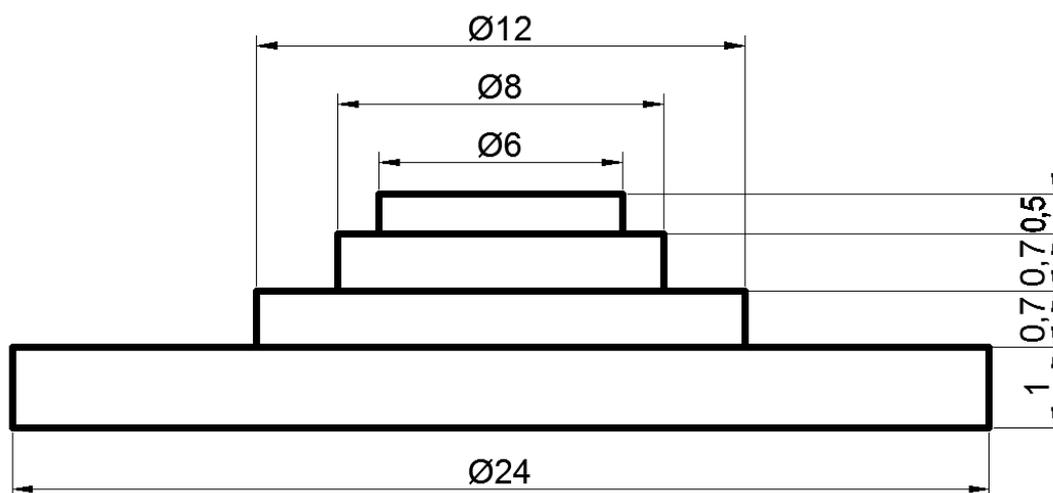


Рисунок 3.3 – Форма и размеры фильтрующего элемента

В дальнейшей работе параметры фильтрующего элемента не отличались от показанных на рисунке 3.3.

Для моделирования фильтрующего элемента был выбран материал изготовления – АБС пластик, с плотностью $1,06 \text{ г/см}^3$. В связи с тем, что АБС пластик имеет химическую формулу вида:



где C_8H_8 – стирол,

C_4H_6 – бутадиен,

C_3H_3N – акрилонитрил.

При этом в зависимости от производителя, пропорции каждого элемента могут варьироваться в пределах: 15 – 35% акрилонитрила, 5 – 30% бутадиена и 40 – 60% стирола. При моделировании были использованы следующие пропорции: 28% акрилонитрила, 22% бутадиена и 50% стирола.

3.1.3 Моделирование сформированного пучка

Следующим этапом стало моделирование пучка, сформированного фильтрующим элементом. Для сравнения с несформированным пучком на рисунке 3.4 представлена форма электронного пучка в поперечной плоскости на расстоянии 20 см от выходного окна и на рисунке 3.5 изображен профиль электронного пучка, при этом фильтрующий элемент находится на расстоянии 3 см от выходного окна. Полученные в процессе моделирования дозы были нормированы на максимальное значение в слое.

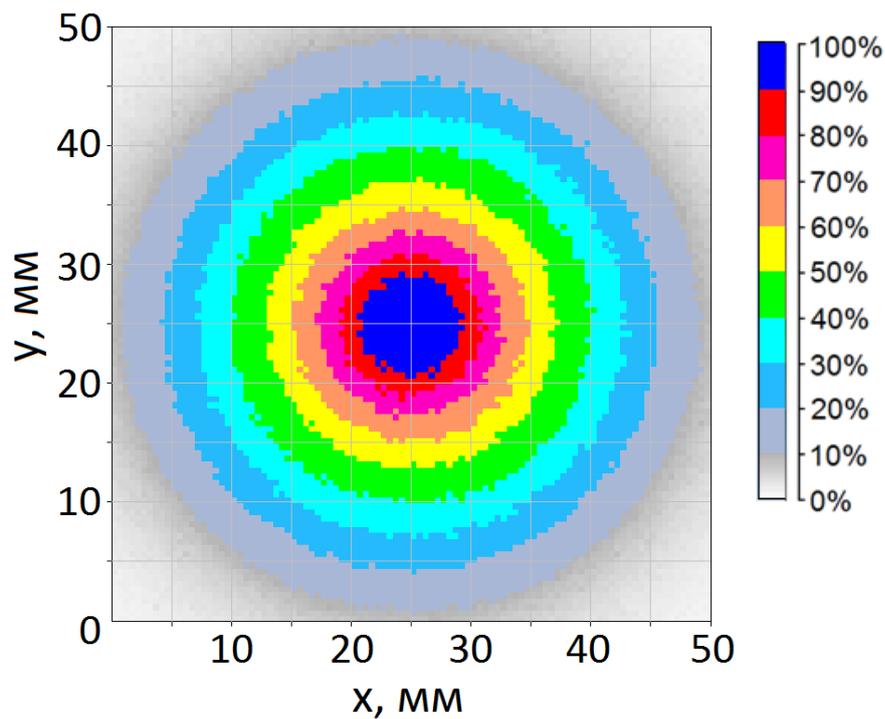


Рисунок 3.4 – Форма сформированного электронного пучка в поперечной плоскости

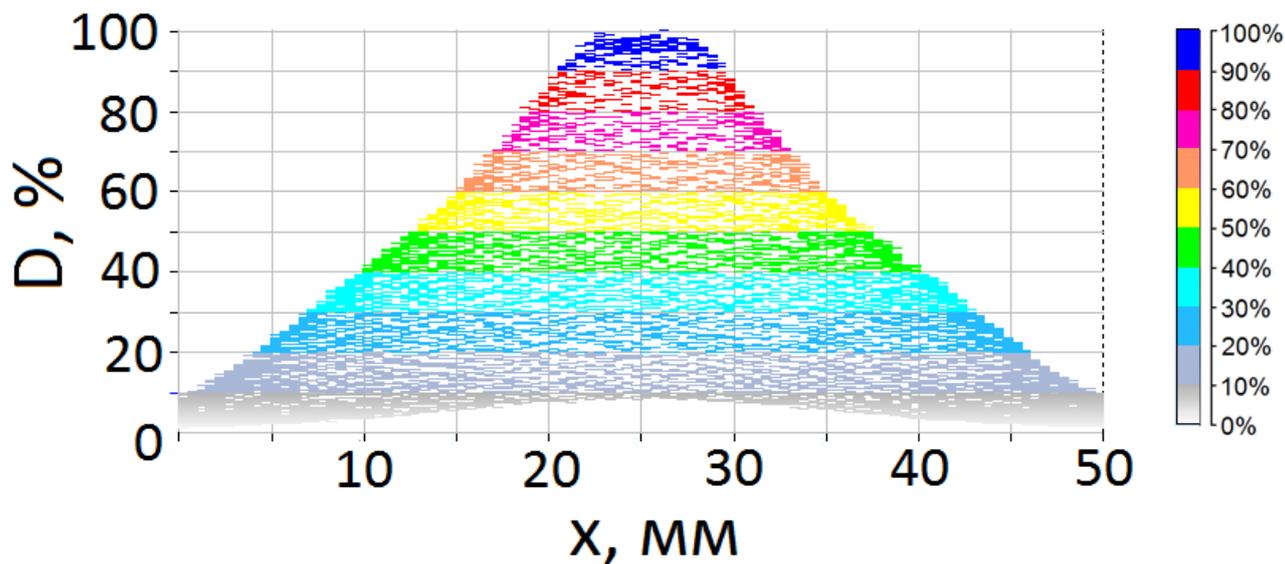


Рисунок 3.5 – Профиль электронного пучка

В ходе моделирования были рассчитаны поперечные профили электронного пучка до и после фильтрации, которые представлены на рисунке 3.6.

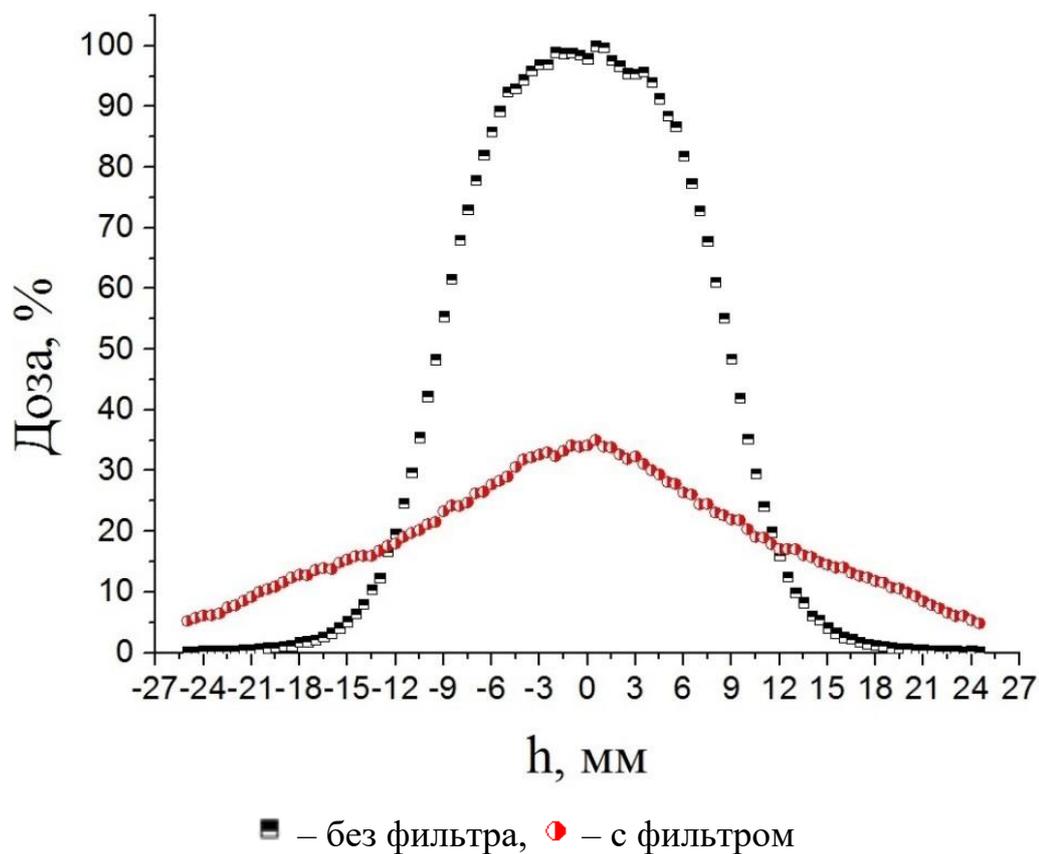


Рисунок 3.6 – Расчетные профили электронных пучков

Здесь и в дальнейшем в процессе моделирования рассчитывается поглощенная доза. По рисунку 3.6 можно утверждать, что пучок после фильтрации имеет более постоянную интенсивность, которая составляет примерно 35% интенсивности несформированного пучка.

Таким образом, в процессе моделирования были подобраны форма и размеры фильтрующего элемента, создана первичная модель на основе реального источника и получены профили электронных пучков с фильтрацией и без.

3.2 Эксперимент

3.2.1 Экспериментальные данные

Следующим этапом диссертационной работы стало изготовление фильтра из АБС пластика. Внешний вид готового изделия показан на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Внешний вид фильтрующего элемента из АБС пластика

На первом этапе была проведена оценка формы исходного пучка микротрона с использованием дозиметрических пленок «Gafchromic EBТ2 Self-developing film for radiotherapy dosimetry». Полученные результаты были обработаны пакетом «MATLAB» и форма исходного пучка представлена на рисунках 3.8 – 3.9.

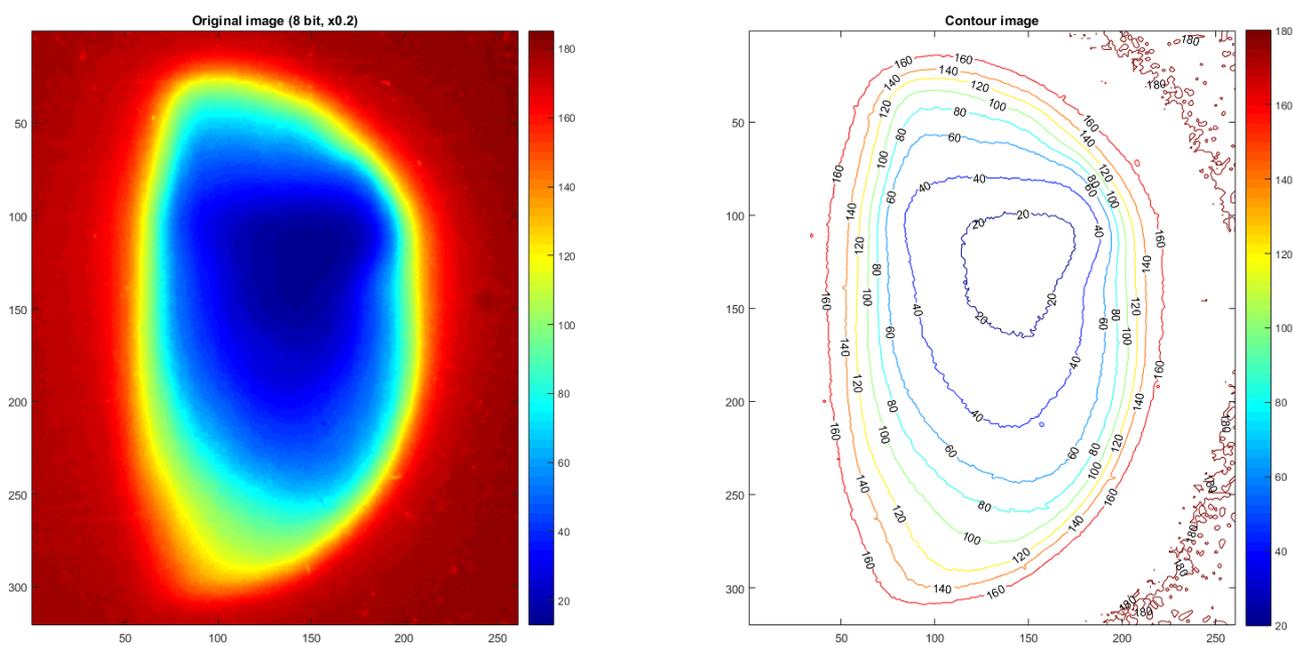


Рисунок 3.8 – Форма электронного пучка на расстоянии 5 см от выходного окна

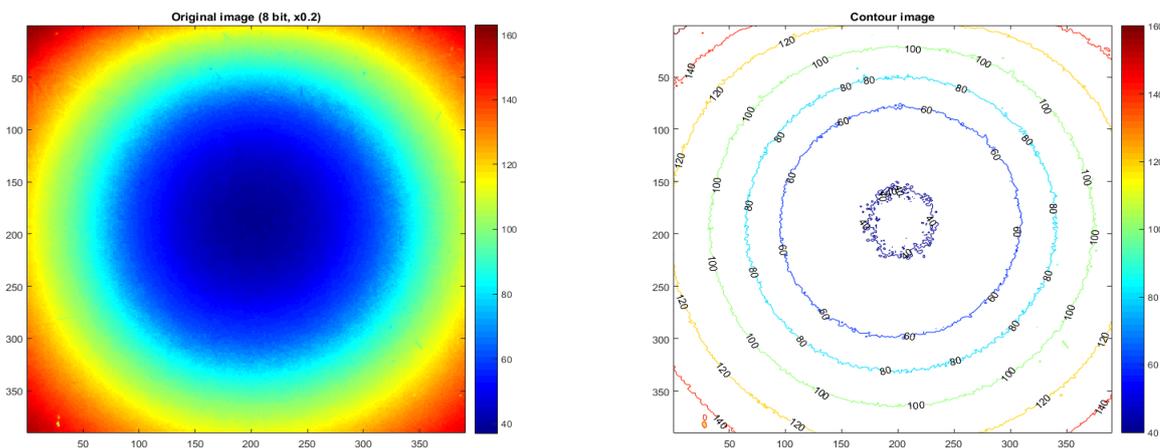


Рисунок 3.9 – Форма электронного пучка на расстоянии 20 см от выходного окна

Из рисунков 3.8 – 3.9 можно отметить, что форма пучка имеет неоднородное распределение в пространстве и меняется при прохождении некоторого расстояния в воздухе.

Форма фильтрованного пучка представлена на рисунке 3.10.

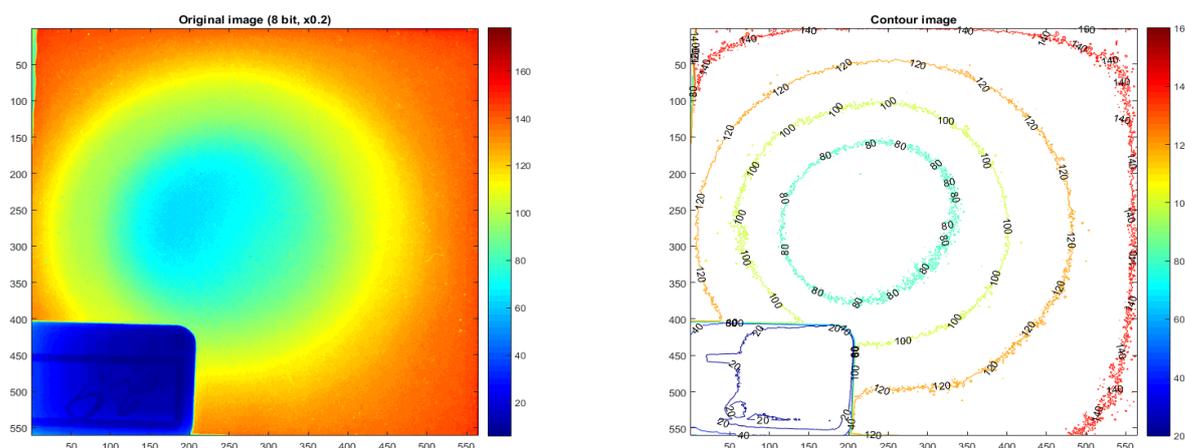


Рисунок 3.10 – Форма фильтрованного электронного пучка на расстоянии 20 см от выходного окна

Из рисунка 3.10 видно, что пучок остается ассиметричным после прохождения фильтрующего элемента. Синие прямоугольники на рисунке 3.10 – это маркировка пленок.

Для дальнейшего представления результатов необходимо отметить, что в процессе моделирования рассчитывается поглощенная доза, а при проведении эксперимента учитывается количество электронов прошедших в детектор. В работе было принято упрощение, заключающееся в том, что

энергетическое распределение электронов равномерно, а, следовательно, дозу, энергию и количество частиц можно считать пропорциональными. В процессе моделирования нормировка производится на максимум дозы в воздухе, в эксперименте – на максимум частиц пришедших в детектор.

На рисунке 3.11 представлена схема эксперимента, где 1 – источник излучения (микротрон), 2 – образец (фильтрующий элемент), 3 – детектор (цилиндр Фарадея).

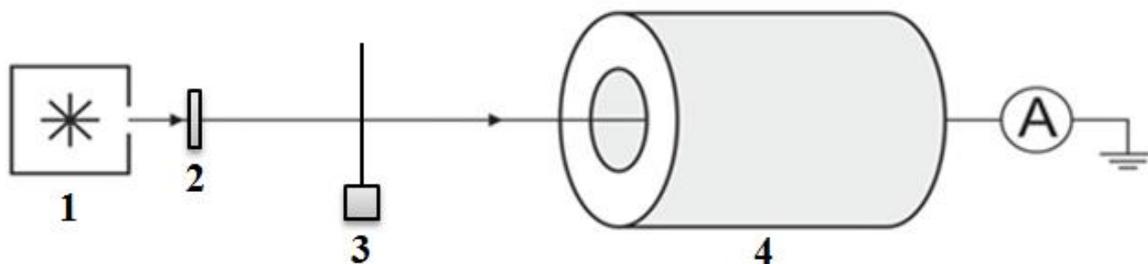
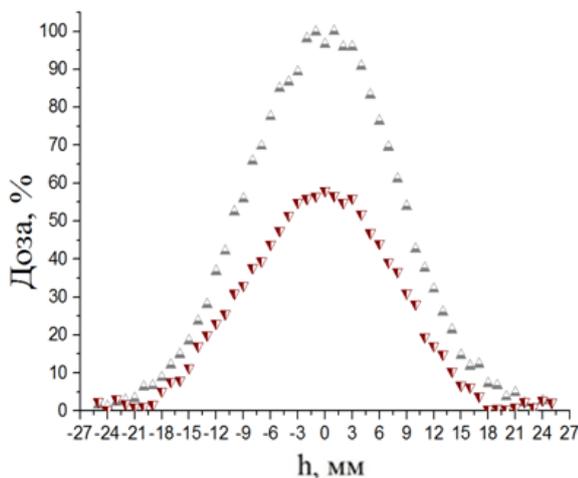


Рисунок 3.11 – Схема эксперимента

При проведении эксперимента были получены профили электронных пучков до и после фильтрации, которые представлены на рисунке 3.12.



▲ – без фильтра, ▼ – с фильтром

Рисунок 3.12 – Экспериментальные профили электронных пучков

По рисунку 3.13 можно утверждать, что пучок после фильтрации имеет более постоянную интенсивность, которая составляет примерно 55% интенсивности несформированного пучка.

Необходимо проанализировать полученные результаты.

3.2.2 Анализ результатов и корректировка модели

Для сравнения на рисунке 3.13-а и 3.13-б представлены расчетный и экспериментальный профили электронного пучка без фильтрующего элемента и после фильтрации соответственно.

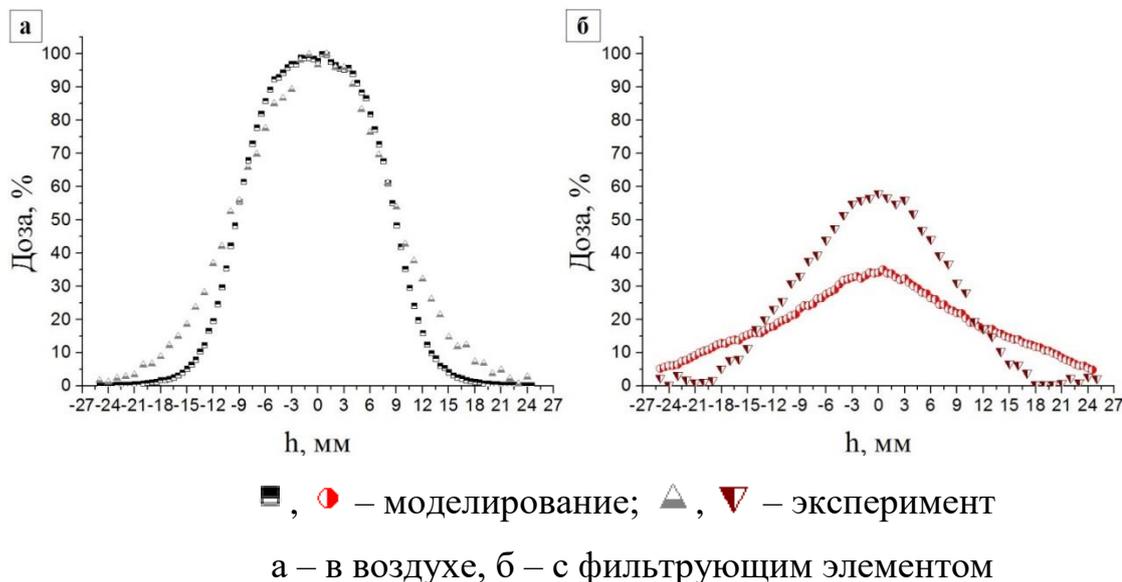


Рисунок 3.13 – Экспериментальный и расчетный профили электронного пучка

Из рисунка 3.13 видно, что расчетные и экспериментальные результаты не совпадают по форме и по эффективности поглощения. Несовпадение результатов по эффективности можно объяснить тем, что фактическая плотность фильтрующего элемента отличается от плотности материала (видно из рисунка 3.7), из которого он изготовлен (плотность АБС пластика равна 1,06 г/см³), это связано с особенностью печати образцов методом послойного наплавления.

Исходя из этого, следующим этапом работы стало определение фактической плотности фильтрующего элемента.

Фактическую плотность изделия можно определить массовым методом, по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

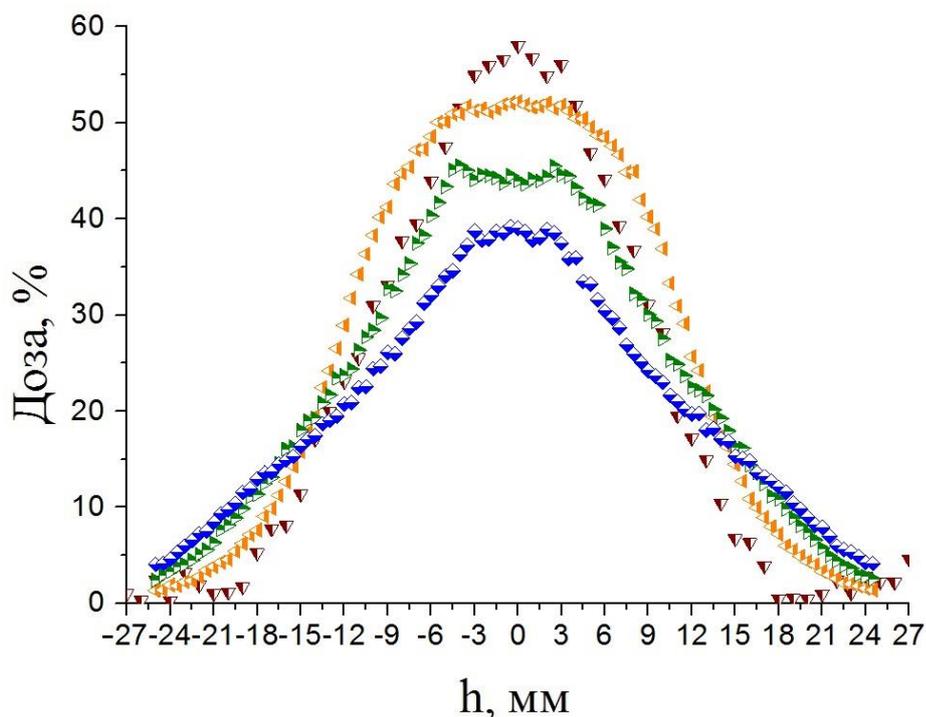
где ρ – плотность образца,

m – масса образца,

V – объем образца.

На весах была измерена масса образца, которая составила 0,429 грамм, с помощью мензурки был измерен объем, который равен 0,5 см³, таким образом, плотность фильтрующего элемента составила 0,856 г/см³. При измерении объема цена деления составила 0,1 см³, а значит, погрешность измерений может быть равна 0,05 см³. В связи с этим, плотность исследуемого образца может варьироваться от 0,78 см³ до 0,95 см³. Таким образом, необходимо определять плотность образца более точными расчетными методами.

Для расчета плотности фильтрующего элемента были получены профили электронных пучков сформированных фильтрующими элементами, имеющими различные плотности: 0,424 г/см³; 0,53 г/см³; 0,636 г/см³; 0,742 г/см³; 0,848 г/см³; 0,954 г/см³. На рисунке 3.14 приведены примеры полученных профилей.



▼ – экспериментальные данные,

◀ – моделирование, плотность фильтрующего элемента – 0,53 г/см³,

▶ – моделирование, плотность фильтрующего элемента – 0,742 г/см³,

◆ – моделирование, плотность фильтрующего элемента – 0,954 г/см³.

Рисунок 3.14 – Экспериментальный и расчетные профили электронных пучков сформированных фильтрующими элементами с различной плотностью

После моделирования для каждой плотности было получено отношение количества прошедших электронов через фильтр к числу электронов без фильтра (k), количество которых высчитывалось путем интегрирования соответствующих профилей. Полученные значения были аппроксимированы прямой. На рисунке 3.15 представлена зависимость коэффициента k от плотности фильтрующего элемента.

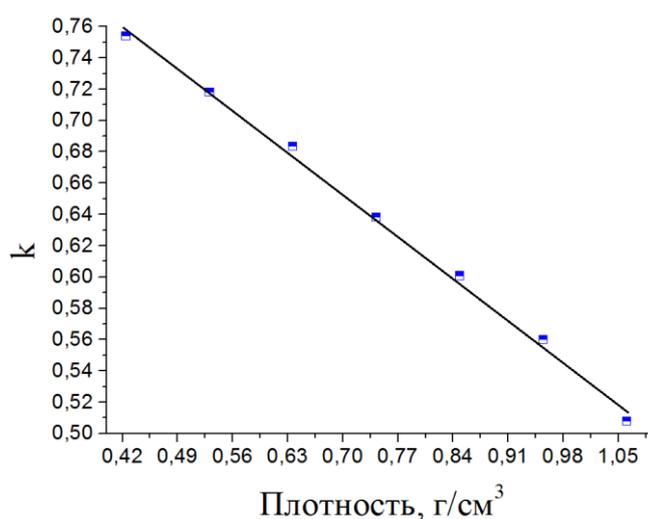
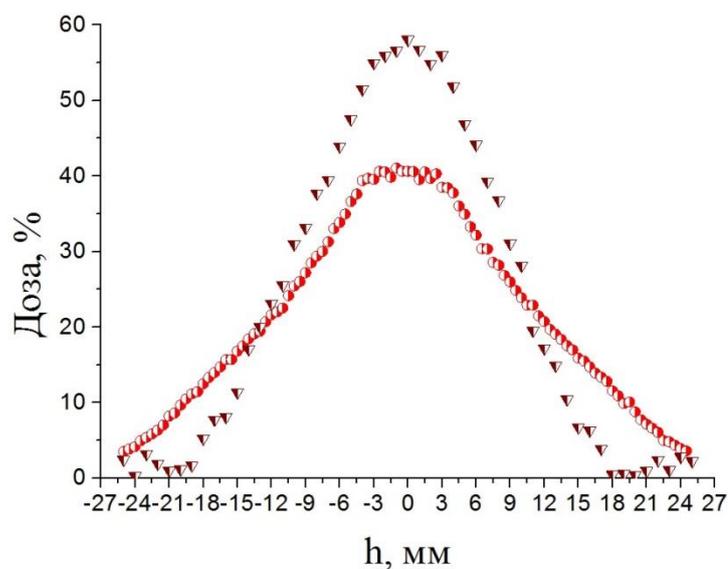


Рисунок 3.15 – Зависимость коэффициента k от плотности фильтрующего элемента

Из рисунка 3.15 и экспериментально полученного значения k по аппроксимирующей прямой была определена фактическая плотность фильтрующего элемента, которая равна $0,901 \text{ г/см}^3$.

На рисунке 3.16 представлены экспериментальный и расчетный профили электронных пучков, сформированных фильтрующим элементом с фактической плотностью $0,901 \text{ г/см}^3$.



● – моделирование; ▼ – эксперимент

Рисунок 3.16 – Экспериментальный и расчетный профили электронных пучков, сформированных фильтрующим элементом с фактической плотностью $0,901 \text{ г/см}^3$

Обнаружены несоответствия формы экспериментального и расчетного профилей пучков, прошедших через фильтры с одинаковой плотностью (рисунок 3.16). На различия в экспериментальном и расчетном профилях сформированного электронного пучка может влиять элементный состав фильтра. Так как точная химическая формула филамента является коммерческой тайной необходимо провести дополнительные расчеты по определению точного элементного состава.

Для сравнения были выбраны несколько различных вариантов элементного состава, встречающегося в литературе:

1. 30% акрилонитрила, 30% бутадиена и 40% стирола;
2. 35% акрилонитрила, 25% бутадиена и 40% стирола;
3. 15% акрилонитрила, 30% бутадиена и 55% стирола.

На рисунке 3.17 представлен пример расчетного со вторым элементным составом АБС пластика и экспериментального профилей электронного пучка после фильтрации.

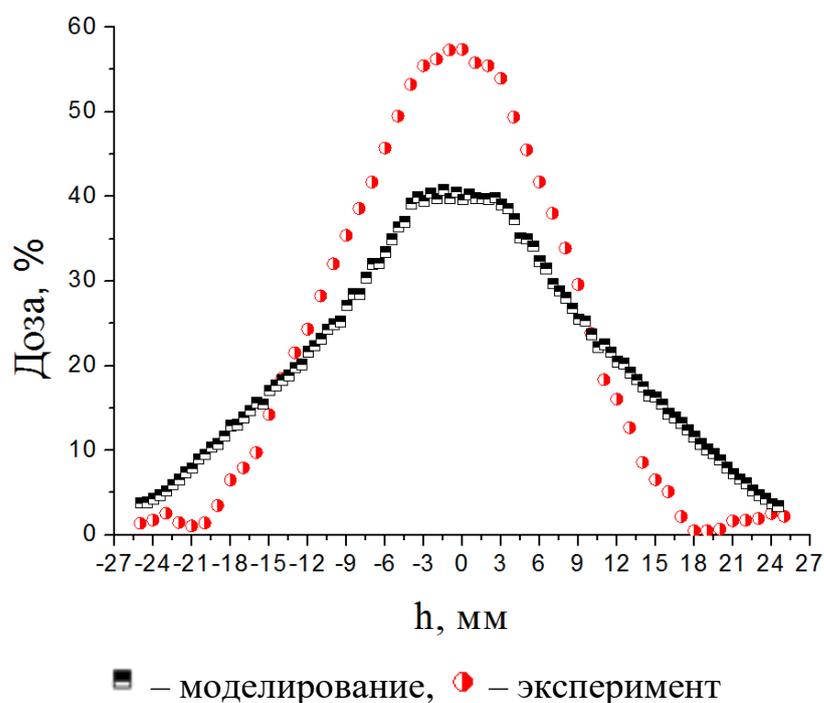


Рисунок 3.17 – Расчетный со вторым элементным составом АБС пластика и экспериментальный профили электронного пучка после фильтрации

По рисунку 3.17 видно, что на форму сформированного электронного пучка элементный состав, варьирующийся в пределах соотношений, используемых в промышленности, АБС пластика не оказывает значительного влияния. Небольшая разница обуславливается тем, что процесс взаимодействия электронов с веществом является случайным.

Таким образом, различие полученных данных обуславливается тем, что интенсивность реального пучка резко возрастает к центру, а при построении модели предполагалось, что интенсивность пучка распределена более равномерно (рисунок 3.13-а).

3.2.3 Методика формирования определенного профиля электронного пучка

В ходе магистерской диссертации была составлена и апробирована методика для формирования определенного профиля электронного пучка, которая представлена далее.

1. Измерение характеристик пучка источника.
2. Создание модели источника излучения на основе измеренных характеристик.

3. Выбор геометрии облучения, подбор форм и размеров фильтрующих и коллимационных систем.

4. Моделирование формируемого пучка, корректировка модели изделия при необходимости.

5. Изготовление фильтрующих и коллимационных систем аддитивным методом.

6. Контрольная оценка характеристик сформированного электронного пучка, корректировка геометрии при необходимости.

При помощи данной методики были рассчитаны, изготовлены и апробированы на электронных ускорителях несколько изделий для корректировки профиля электронных пучков.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Предпроектный анализ

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

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

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Данный анализ проведен с помощью оценочной карты (таблица 4.1). Для этого отобрано две конкурентные разработки. Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 4.1, подбирали исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Время наработки данных	0,2	2	4	4	0,4	0,8	0,8
2. Помехоустойчивость	0,07	5	3	3	0,35	0,21	0,21
3. Безопасность	0,2	5	5	4	1	1	0,8
4. Потребность в ресурсах памяти	0,05	5	3	3	0,25	0,15	0,15
5. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,06	5	5	4	0,3	0,3	0,24
6. Простота в эксплуатации	0,09	4	3	4	0,36	0,27	0,36
7.Наличие дорогостоящего оборудования	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	5	3	2	0,15	0,09	0,06
2. Цена	0,1	5	3	1	0,5	0,3	0,1
3. Финансирование научной разработки	0,05	3	4	4	0,15	0,2	0,2
4. Наличие сертификации разработки	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
Итого	1				4,16	3,82	3,52

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

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

Сегодня на практике для формирования терапевтического пучка электронов применяется система фильтрующих фольг и коллиматоров. Такой подход существенно усложняет и удорожает процесс разработки клинического ускорителя для доставки терапевтического электронного пучка. Изготовление фильтров, блоков и коллимирующих систем методами 3D-печати, форма которых рассчитана с учетом непосредственной задачи, позволит быстро и точно сформировать любой профиль пучка произвольной формы. Возможность создания фильтров неправильной формы позволяет единомоментно формировать поле облучения с неоднородным распределением дозы в объеме мишени [24].

Данный анализ позволяет говорить о том, что исследование является эффективным, так как обеспечивает приемлемое качество результатов. Дальнейшее инвестирование данной разработки можно считать целесообразными.

4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

SWOT-анализ заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые

проявились или могут появиться в его внешней среде. SWOT-анализ данного научно-исследовательского проекта представлен в таблице Б1.

На основе результатов анализа данной матрицы можно сделать вывод о том, что трудности и проблемы, с которыми так или иначе может столкнуться данный исследовательский проект можно будет решить за счет имеющихся сильных сторон исследования.

4.2 Планирование управления научно-техническим проектом

4.2.1 Иерархическая структура работ проекта

В процессе создания иерархической структуры работ проекта структурированы и определены содержание всего проекта, которые представлены на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 –Иерархическая структура работ

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей. Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ.

4.2.2 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела определены ключевые события проекта, их даты и результаты, которые получены по состоянию на эти даты. Информация сведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания	08.02.2016	Приказ о ВКР
1.1	Составление технического задания	12.02.2016	–
2.1	Определение направления исследования	17.02.2016	–
2.2	Анализ и изучение технической литературы	22.02.2016 – 14.03.2016	Список литературы
3.1	Изучение программного обеспечения	28.03.2016	–
3.2	Создание модели	04.04.2016	–
3.3	Анализ и обработка теоретически полученных данных	04.04.2016 – 11.04.2016	Отчет
4.1	Разработка методики эксперимента	18.04.2016	Методика
4.2	Проведение эксперимента	25.04.2016 – 29.04.2016	–
4.3	Анализ и обработка экспериментально полученных данных	02.05.2016 – 16.05.2016	Отчет
5.1	Сравнение полученных данных	16.05.2016 – 23.05.2016	Отчет
5.2	Корректировка модели	23.05.2016 – 30.05.2016	–
5.3	Оформление пояснительной записки	30.05.2016	Пояснительная записка
5.4	Подготовка к защите диссертационной работы	01.06.2016 – 10.06.2016	Презентация

4.2.3 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта, представленный в таблице 4.3. Далее с помощью диаграммы Ганта в таблице 4.4 проиллюстрирован календарный план проекта, на котором работы по теме характеризуются датами начала и окончания выполнения данных работ [25].

Таблица 4.3 – Календарный план проекта

Код	Название	Тк, кал. дн.	Дата начала и окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	4	08.02.2016 – 12.02.2016	руководитель
1.1	Составление технического задания	5	12.02.2016 – 17.02.2016	руководитель
2.1	Определение направления исследования	5	17.02.2016 – 22.02.2016	руководитель магистрант
2.2	Анализ и изучение технической литературы	21	22.02.2016 – 14.03.2016	магистрант
3.1	Изучение программного обеспечения	7	14.03.2016 – 28.03.2016	магистрант
3.2	Создание модели	7	28.03.2016 – 04.04.2016	руководитель магистрант
3.3	Анализ и обработка теоретически полученных данных	7	04.04.2016 – 11.04.2016	магистрант
4.1	Разработка методики эксперимента	7	11.04.2016 – 18.04.2016	руководитель магистрант
4.2	Проведение эксперимента	14	18.04.2016 – 29.04.2016	руководитель магистрант
4.3	Анализ и обработка экспериментально полученных данных	14	02.05.2016 – 16.05.2016	магистрант
5.1	Сравнение полученных данных	7	16.05.2016 – 23.05.2016	магистрант
5.2	Корректировка модели	7	23.05.2016 – 30.05.2016	магистрант
5.3	Оформление пояснительной записки	100	22.02.2016 – 31.05.2016	магистрант
5.4	Подготовка к защите диссертационной работы	7	01.06.2016 – 10.06.2016	руководитель магистрант

Таблица 4.4 – Календарный план-график в виде диаграммы Ганта.

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , чел. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Февр		Март			Апрель			Май			Июн	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Разработка технического задания	руководитель	4	■												
1.1	Составление технического задания	руководитель	5	■	■											
2.1	Определение направления исследования	руководитель магистрант	5		■											
2.2	Анализ и изучение технической литературы	магистрант	21		■	■	■									
3.1	Изучение программного обеспечения	магистрант	7			■	■	■								
3.2	Создание модели	руководитель магистрант	7					■	■	■						
3.3	Анализ и обработка теоретически полученных данных	магистрант	7					■	■	■						
4.1	Разработка методики эксперимента	руководитель магистрант	7						■	■	■					
4.2	Проведение эксперимента	руководитель магистрант	14							■	■	■	■	■	■	
4.3	Анализ и обработка экспериментально полученных данных	магистрант	14									■	■	■	■	■
5.1	Сравнение полученных данных	магистрант	7										■	■	■	
5.2	Корректировка модели	магистрант	7											■	■	■
5.3	Оформление пояснительной записки	магистрант	100	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5.4	Подготовка к защите диссертационной работы	руководитель магистрант	7												■	■

4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

1. Материалы.
2. Затраты на оплату труда работников, непосредственно участвующих в НИОКР.
3. Отчисления во внебюджетные фонды.
4. Работы, выполняемые сторонними организациями.
5. Спецоборудование для научных и экспериментальных работ.
6. Прочие прямые расходы.
7. Накладные расходы.

Статьи 1-7 относятся к прямым затратам, величину прямых затрат, как правило, следует определять прямым счетом, это затраты, связанные

непосредственно с выполнением конкретного НИТ, остальные затраты рассчитываются косвенным способом, это затраты на содержание аппарата управления, общетехнических и общехозяйственных служб, они объединяются в статье «Накладные расходы».

4.3.1 Расчет материальных затрат

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на АБС-пластик. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
АБС-пластик	Картридж Мастер-Пластер	1 шт.	710	710
Электроэнергия	–	300 кВт·ч	2,05	615
Бумага	SvetoCopy	1 пачка	210	210
Ручка	Pilot	1	30	30
Доступ в интернет	–	4 месяца	450	1800
Всего за материалы				3365
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого:				3365

4.3.2 Расчёт амортизации оборудования для экспериментальных работ

Данная статья включает в себя все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по тематике диссертации.

В данной диссертационной работе к спецоборудованию, необходимому для проведения экспериментальных работ, относятся микротрон НИИ ядерной физики при ТПУ, который был собран сотрудниками института и его ориентировочная стоимость составляет 2500000 рублей при назначенном сроке службы – 30 лет и принтер для трехмерной печати «Up! Plus 2», стоимость которого составляет 60000 рублей, назначенный срок службы – 7 лет.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{аморт}} = C_{\text{об}}/T, \quad (4.2)$$

где $C_{\text{об}}$ – стоимость оборудования в рублях; T – срок службы, в количестве дней.

$$C_{\text{аморт}} = C_{\text{об}}/T = 2500000/(30 * 365) + 60000/(7 * 365) = 251,8 \text{ руб/день.}$$

Оборудование использовалось в течение 60 дней, таким образом, затраты на оборудование:

$$C_{\text{аморт.общ}} = 251,8 \cdot 60 = 15108 \text{ руб.}$$

В себестоимость НТИ также была включена стоимость электроэнергии, освещения и отопления помещения.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}}, \quad (4.3)$$

где $C_{\text{эл}}$ – тариф на промышленную электроэнергию (2,05 рублей за 1 киловатт в час); P – мощность оборудования измеряется в кВт; $F_{\text{об}}$ – время использования оборудования в часах.

При выполнении работы использовался стационарный компьютер со средней мощностью 550 Вт (0,55 кВт). Если предположить, что вся работа выполнялась на нем, то, всего было израсходовано:

$$E = P \cdot F_{\text{об}} = 0,55 \cdot 480 = 264 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Рассчитывался восьмичасовой рабочий день, при пятидневной рабочей неделе.

Затраты на энергию:

$$C = 2,05 \cdot 264 = 541,2 \text{ руб}$$

Затраты на отопление, определяющиеся по следующей формуле:

$$Z_{\text{отоп}} = (a \cdot T \cdot V) \cdot C, \quad (4.4)$$

где a – количество тепла на 1 м³ помещения ($12,57 \cdot 10^{-5}$ Гкал); T – продолжительность отопительного сезона; V – объем отапливаемого помещения ($5 \times 5 \times 2,6$ м³); C – стоимость 1 Гкал тепла (1021,07 рублей).

$$Z_{\text{отоп}} = (12,57 \cdot 10^{-5} \cdot 81 \cdot 65) \cdot 1021,07 = 675,75 \text{ руб.}$$

Затраты на освещение вычисляются следующим образом:

$$Z_{\text{осв}} = \frac{(15 \cdot S_f \cdot M \cdot t)}{1000} \cdot C, \quad (4.5)$$

где S_f – площадь пола (20 м²); M – количество часов искусственного освещения в сутки (7 ч); t – число рабочих дней (81 дня); C – стоимость 1 кДж электроэнергии (2,05 руб).

$$Z_{\text{осв}} = \frac{(15 \cdot 7 \cdot 20 \cdot 81)}{1000} \cdot 2,05 = 348,705 \text{ руб.}$$

Итого стоимость электроэнергии, освещения и отопления помещения составила:

$$541,2 + 675,75 + 348,705 = 1565,655 \text{ руб.}$$

4.3.3 Затраты на оплату труда исполнителей НТИ

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату [26].

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (4.6)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата; $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1. оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

2. стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается

исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (4.7)$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата в рублях; $K_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты; $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата в рублях.

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (4.8)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника; $T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником в рабочих днях; $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника в рублях.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (4.9)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях).

Количество месяцев работы без отпуска в течение года рассчитывается следующим образом: при отпуске в 28 рабочих дней $M = 11$ месяцев, 5-дневная неделя.

Основная заработная плата руководителя за период проведения работ (32 рабочих дня) равна:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{14968 \cdot 11}{249} = 838 \text{ руб./день}.$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} = 838 \cdot 32 = 26816 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,50 \cdot 26816 = 13408 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 26816 + 13408 = 40224 \text{ руб.}$$

Заработная плата магистра состоит из стипендии. Магистр, выполнивший данную работу, получает стипендию в размере 5650 руб. Заработная плата составит:

$$C = 5650 \cdot 3 = 16950 \text{ руб}$$

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30% в 2016 от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением НИОКР [27].

$$C_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.10)$$

где $K_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений в социальные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (26816 + 13408) = 12067,2 \text{ руб.}$$

4.3.5 Накладные расходы

Для учета накладных расходов нужно учесть расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных (общеуниверситетских) служб, которые в равной степени относятся ко всем выполняемым НТИ. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозинвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 6) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.11)$$

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

Величину коэффициента накладных расходов взята в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = (3365 + 15108 + 1565,655 + 40224 + 16950 + 12067,2) \cdot 0,16 = 14284,8 \text{ руб.}$$

4.4 Формирование бюджета затрат научно-технического исследования (НТИ)

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта. Определение

бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.6 [26].

Таблица 4.6 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Стоимость затрат, в рублях (руководитель+магистр)
1. Материальные затраты НТИ	3365
2. Затраты на оборудование	15108
3. Затраты на энергию	541,2
4. Затраты на отопление	675,75
5. Затраты на освещение	348,705
6. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	43766
7. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	13408
8. Отчисления во внебюджетные фонды	12067,2
9. Накладные расходы	14284,8
10. Бюджет затрат НТИ	103564,655

В ходе выполнения экономической части ВКР были проведены расчеты плановой себестоимости проведения НТИ и времени, необходимого на проведение ВКР. Плановая себестоимость работы составляет 103564,655 руб., основная составляющая, которой – заработная плата исполнителей НТИ.

4.5 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта — наиболее соответствующая проекту временная организационная структура, включающая всех его участников и создаваемая для успешного достижения целей проекта.

Разработка организационной структуры проекта включает:

- идентификацию всех организационных единиц;
- определение ролей участников проекта и их взаимодействия,
- определение ответственности и полномочий;

- распределение ответственности и полномочий между организационными единицами структуры;
- разработку инструкций, регламентирующих взаимодействия в структуре и рабочие процедуры.

Организационная структура проекта является динамической структурой, которая претерпевает изменения в процессе осуществления проекта. Эти изменения зависят от фаз жизненного цикла проекта, типов, используемых в проекте контрактов, и других условий выполнения проекта. Организационная структура данного проекта представлена на рисунке 4.2.

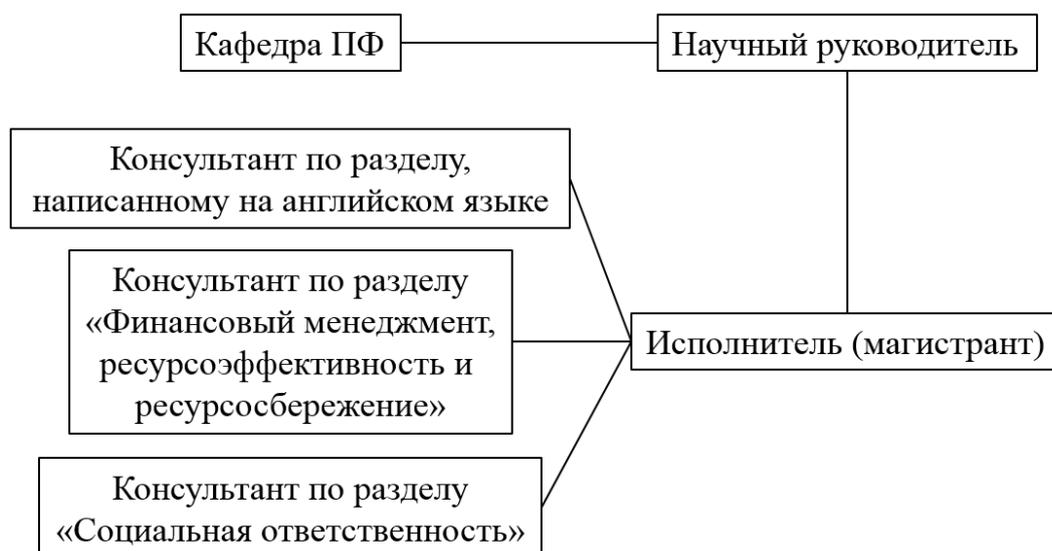


Рисунок 4.2 –Иерархическая структура работ

4.6 Матрица ответственности

Матрица ответственности определяет степень ответственности каждого члена проекта за ту или иную задачу, если он имеет к ней некоторое отношение [28].

Таблица 4.8 – Матрица ответственности

Этапы исследования	Научный руководитель	Консультант Англ.яз.	Консультант менеджмент	Консультант Соц.отв-ть.	Магистрант
Сбор и изучение научно-технической литературы	О				И
Изучение программного обеспечения	О				И
Моделирование процесса	О				И
Анализ и обработка полученных теоретически результатов	О				И
Разработка методики экспериментальных исследований	О				И
Проведение экспериментальных исследований	О				И
Анализ и обработка полученных экспериментально результатов	О				И
Оценка ресурсоэффективности и ресурсосбережения			С		И
Раздел социальной ответственности				С	И
Перевод раздела на английский язык		С			И
Оформление пояснительной записки и презентации	С				И

Ответственный (О)– лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход. Исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение). Согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям [29].

4.7 Определение ресурсной эффективности исследования

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.12)$$

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

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности данного исследования представлен в форме таблицы 4.8.

Таблица 4.8 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	4	3	2
3. Помехоустойчивость	0,3	3	4	4
4. Энергосбережение	0,1	4	5	4
5. Надежность	0,2	5	3	4
6. Материалоемкость	0,1	5	5	5
ИТОГО	1	4,1	3,8	3,6

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_i}{\Phi_{max}}, \quad (4.13)$$

где Φ_i – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{max}} = \frac{103600}{120000} = 0,86; \quad I_{\Phi}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{111000}{120000} = 0,925; \quad I_{\Phi}^{a2} = \frac{\Phi_{a2}}{\Phi_{max}} = \frac{120000}{120000} = 1.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{финр}^p$) и аналога ($I_{финр}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p}, \quad I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a}, \quad (4.14)$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{4,1}{0,86} = 4,77; \quad I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{3,8}{0,925} = 4,11; \quad I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{3,6}{1} = 3,6$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\Xi_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_m^p}, \quad (4.14)$$

Таблица 4.9 – Сравнительная эффективность анализа

№ п/п	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки и аналогов	3,8	3,6	4,1
2	Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки и аналога	4,11	3,6	4,77
3	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,08	1	1,16

На основе расчета интегрального показателя с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности научного исследования можно заключить что, сравнительная оценка текущего проекта выше других аналогов.

Таким образом, итоговая себестоимость НИР составила 103564,655 рубля, время, необходимое для выполнения работы, составило 105 календарных дней.

Заключение

В ходе магистерской диссертации были рассчитаны и экспериментально получены поперечные профили электронного пучка до и после применения разрабатываемых фильтрующих элементов. Для этого была определена форма и рассчитаны геометрические размеры изделия, формирующего определенный профиль электронного пучка, который впоследствии был изготовлен. А также были созданы модель источника излучения – микротрона ТПУ и модели рассчитанных фильтрующих элементов. После анализа результатов были обнаружены несоответствия между экспериментальными и расчетными профилями электронного пучка по форме и по эффективности поглощения, в связи с чем, возникла необходимость проведения корректировки параметров численного моделирования.

Таким образом, следующим этапом стала корректировка модели по плотности готового изделия. Фактическая плотность фильтрующего элемента, предназначенного для формирования электронных пучков, изготовленного при помощи технологии трехмерной печати методом послойного наплавления, была определена массовым и экспериментально-расчетным методами. В ходе исследования определена фактическая плотность фильтра, предназначенного для формирования электронных пучков, изготовленного методом послойного наплавления, равная $0,901 \text{ г/см}^3$.

Оценка влияния элементного состава АБС пластика, из которого изготавливаются фильтрующие элементы, на его взаимодействие с электронами показала незначительные изменения формы профиля пучка. Таким образом, корректировка состава АБС пластика в модели не требуется.

Полученные при помощи пленочных дозиметров данные показали, что различие полученных данных по форме обуславливается тем, что интенсивность реального пучка микротрона достаточно резко возрастает к центру, а при построении модели предполагалось, что интенсивность пучка распределена более равномерно.

В ходе магистерской диссертации была разработана и апробирована методика для формирования произвольного профиля электронного пучка, при помощи которой аддитивным методом были созданы фильтрующие элементы, которые были испытаны на электронных ускорителях.

Список публикаций студента

Опубликованные статьи в научной периодике, индексируемой международными базами данных:

1. Miloichikova I. A. , Stuchebrov S. G. , Krasnykh A. A. , Vagner A. R. Dose rate spatial distribution produced by the pulsed X-ray source in the radiographic examination // *Advanced Materials Research*. - 2015 - Vol. 1084. - p. 598-601
2. Miloichikova I. A. , Stuchebrov S. G. , Krasnykh A. A. , Vagner A. R. Radiation dose measurement technique of the X-ray source in the process of stabilization // *Advanced Materials Research*. - 2015 - Vol. 1085. - p. 478-481
3. Stuchebrov S. G. , Batranin A. V. , Krasnykh A. A. , Miloichikova I. A. , Vagner A. R. Radiation burden decline to the objects in the X-ray investigation // *Advanced Materials Research*. - 2015 - Vol. 1084. - p. 698-701

Тезисы докладов:

1. Красных А. А. , Милойчикова И. А. , Стучебров С. Г. Анализ характера поглощения электронов АБС-пластиком с металлическими примесями // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 14-16 Октября 2015. - Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2015 - С. 89
2. Stuchebrov S. G. , Cherepennikov Y. M. , Gogolev A. S. , Krasnykh A. A. , Vagner A. R. Dose rate in one-photon and two-photon X-ray investigations // *Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena: Book of Abstracts of 6th International Conference, Capri, October 5-10, 2014*. - Frascati: INFN, 2014 - p. 141
3. Красных А. А. , Батранин А. В. , Стучебров С. Г. Разработка алгоритма калибровки томографических установок по индексам хаунсфилда [Электронный ресурс] // *Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности: сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции, Томск, 5-7 Июня 2014*. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 80. - Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C49/C49.pdf>

Статьи, принятые к печати:

1. Miloichikova I. A., Stuchebrov S. G., Verigin D. A., Krasnykh A. A., Danilova I. B. Simulation of the X-Ray Beam Absorption by the ABS-Plastic Filled with Different Metallic Additives // Journal of Physics: Conference Series. - 2016
2. Stuchebrov S. G., Miloichikova I. A., Krasnykh A. A. Numerical Simulation of the Medical Linear Accelerator Electron Beams Absorption by ABS-Plastic doped with Metal Additives // Journal of Physics: Conference Series. – 2016
3. Стучебров С. Г., Вагнер А.Р., Красных А. А., Милойчикова И. А. Измерение и анализ дозиметрических характеристик тормозного излучения бетатрона ОБЬ-4 // Известия высших учебных заведений. – 2016
4. Милойчикова И. А., Вагнер А.Р., Красных А. А., Стучебров С. Г. Работа дозиметрических систем с импульсными рентгеновскими источниками // Известия высших учебных заведений. – 2016
5. Данилова И. Б., Красных А. А., Милойчикова И. А., Стучебров С. Г. Моделирование взаимодействия гамма-излучения и АБС-пластика с различными металлическими примесями // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2016
6. Красных А. А., Милойчикова И. А., Стучебров С. Г. Анализ характера взаимодействия электронных пучков с модифицированным АБС-пластиком // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2016

