Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

На правах рукописи

БУЛАВСКАЯ АНГЕЛИНА АЛЕКСАНДРОВНА

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОУГЛОВОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПУЧКА

Шифр и наименование специальности
01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук, доцент
Стучебров Сергей Геннадьевич

Томск – 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5

Глава 1. Методы регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в попречном сечении пучков 15

1.1 Люминесцентные детекторы 15

1.2 Сканирующие детекторы 18

1.3 Оптические методы детектирования пучков ионизирующего излучения .. 22

1.4 Методы регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучков относительно больших размеров 25

1.5 Применение методов реконструкции для определения параметров пучков заряженных частиц 26

Глава 2. Исследование возможности регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка методом многоуглового сканирования .. 28

2.1. Концепция метода многоуглового сканирования для регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка 28

2.2. Математическая реконструкция и определение критерия оценки реконструированных изображений 29

2.3. Поиск оптимального количества проекций для реализации метода многоуглового сканирования пучка 32

2.3.1. Реконструкция распределения с одним максимумом и одним минимумом 33

2.3.2. Реконструкция распределения с несколькими максимумами и минимумами 36

Глава 3. Разработка экспериментальной установки для регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка 42

3.1. Регистрация энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью металлического сканирующего детектора 43

3.1.1 Проведение эксперимента на основе металлического сканирующего детектора 43

3.1.2 Результаты эксперимента, проведенного с использованием сканирующего металлического детектора..... 47

3.1.3 Анализ результатов экспериментов, проведенных с использованием сканирующего металлического детектора..... 53

3.2. Регистрация энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого в диэлектрическом материале..... 55

3.2.1 Проведение эксперимента по построчному торцевому сканированию электронного пучка с помощью диэлектрического фибера 55

3.2.2 Результаты эксперимента построчного торцевого сканирования электронного пучка, полученные с помощью оптоволоконного кабеля 61

3.2.3 Анализ результатов экспериментов построчного торцевого сканирования электронного пучка, проведенных с использованием оптоволоконного кабеля..... 65

3.2.4 Исследование возможности регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью диэлектрического фибера методом многоуглового сканирования..... 68

3.3. Регистрация энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью сцинтилляционного проволочного детектора..... 69

3.3.1 Проведение эксперимента на основе сцинтилляционного элемента . 69

3.3.2 Результаты эксперимента, полученные с помощью сцинтилляционного сканирующего детектора..... 73

3.3.3 Анализ результатов экспериментов, проведенных с использованием сцинтилляционного сканирующего детектора 77

3.4 Сравнение результатов, полученных с помощью всех разработанных детекторов 80

Глава 4. Регистрация энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка методом многоуглового сканирования 82

4.1. Применение метода многоуглового сканирования на импульсном рентгеновском пучке 83

4.1.1 Проведение эксперимента на импульсном рентгеновском пучке 83

4.1.2 Результаты эксперимента на импульсном рентгеновском пучке 85

4.1.3 Анализ результатов эксперимента на импульсном рентгеновском пучке 89

4.2. Применение метода многоуглового сканирования на электронном пучке 90

4.2.1 Проведение эксперимента на электронном пучке бетатрона 90

4.2.2 Результаты эксперимента на электронном пучке бетатрона 92

4.2.3 Анализ результатов эксперимента на электронном пучке бетатрона 93

4.3. Применение метода многоуглового сканирования на рентгеновском пучке постоянного действия 94

4.3.1 Проведение эксперимента на рентгеновском пучке постоянного действия 95

4.3.2 Результаты эксперимента на рентгеновском пучке постоянного действия 97

4.3.3 Анализ результатов эксперимента на рентгеновском пучке постоянного действия 99

Заключение 101

Список литературы 103

Приложение 1 117

Приложение 2 118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Постоянное расширение области применения пучков ионизирующего излучения, а также развитие способов их генерации приводит к необходимости разработки новых усовершенствованных методов для диагностики характеристик пучков. Развитие диагностических методов позволяет увеличивать точность определения параметров пучка, оптимизировать режимы работы ускорительной установки и получать востребованные и конкурентоспособные экспериментальные результаты фундаментальных исследований, а также решать прикладные задачи. Осуществлять контроль параметров пучков ионизирующего излучения необходимо при различной работе с ускорительной техникой, такой как ввод в эксплуатацию нового или усовершенствованного ускорителя, в ходе регулярной работы, а также для оптимизации или поиска необходимых параметров пучка в соответствии с поставленной задачей.

Одним из важных пространственных параметров пучков ионизирующего излучения является энергетическое распределение излучения в поперечном сечении пучка. В физическом эксперименте для регистрации данной характеристики могут использовать люминофорные экраны. Недостатком таких датчиков является их непрозрачность и недолговечность. Также используются вторично-эмиссионные детекторы, например, сетчатый датчик или детектор, основанный на проволочном сканировании. Такие детекторы позволяют определять только характерные размеры пучков при минимальных потерях заряженных частиц с разрешением равным толщине детектирующей проволоки. Помимо этого, могут использоваться методы детектирования, основанные на измерении переходного излучения, которое генерируется при пересечении пучком границы сред с разными диэлектрическими свойствами. Такой метод является возмущающим. Другой тип детекторов для определения пространственных характеристик пучков основан на использовании интерферометров. Такой детектор представляет собой сложную оптическую систему, которая требует постоянного прецизионного контроля ее параметров.

Как и при проведении физических экспериментов, контроль пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения очень важен и при решении прикладных задач, например, при использовании пучков в лучевой терапии. В клинической практике для регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка используют матричные детекторы, состоящие из набора ионизационных камер или полупроводниковых детекторов. Повсеместное применение таких систем обусловлено, прежде всего, простотой использования и мгновенным получением значений доз в абсолютных величинах. Однако, распределение интенсивности излучения, полученное при помощи матричных детекторов, имеет низкое разрешение. Кроме матричных детекторов для проведения клинической дозиметрии используют пленочные дозиметры, которые позволяют регистрировать энергетическое распределение ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка с высоким разрешением. К недостаткам использования пленок можно отнести необходимость применения расходных материалов, которое повышает эксплуатационную стоимость данных устройств, необходимость контроля параметров сменных детекторов, а также трудоемкость процесса обработки облученных пленочных дозиметров. Описанные методы получения пространственных параметров пучков оказывают на него слишком большое воздействие, в большинстве случаев полностью его поглощая, что делает невозможным регистрацию энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка в процессе ускорения частицу или облучения.

В связи с этим существует необходимость разработки метода, позволяющего создавать устройства, которые будут регистрировать энергетическое распределение ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка с высоким пространственным разрешением в режиме реального времени, с минимальными потерями ионизирующего излучения в рабочем теле детектора. Такой метод не должен предполагать использование расходных материалов, которые необходимо заменять после одного или нескольких измерений, при этом система должна быть

устойчива к внешнему электромагнитному излучению, которое генерируется при работе ускорительной техники.

Объектами исследования являются пучки ионизирующих излучений и их пространственные характеристики.

Предметом исследования являются методы и устройства для измерения пространственных характеристик пучков ионизирующих излучений.

Целью диссертационной работы является разработка и эффективное применение метода многоуглового сканирования для регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

В соответствии с общей целью работы в диссертации решаются следующие **основные задачи**:

1. разработка концепции метода многоуглового сканирования пучка ионизирующего излучения на основе обратного преобразования Радона;
2. определение критериев количественной оценки точности результатов, полученных методом многоуглового сканирования пучка;
3. определение оптимального количества сканирований, необходимого для получения достоверных результатов реконструкции данных, полученных методом многоуглового сканирования пучка;
4. разработка и создание экспериментальных установок для регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка;
5. сравнение экспериментальных результатов, полученных методом многоуглогого сканирования пучка ионизирующего излучения на созданных установках;
6. эффективное применение метода многоуглового сканирования для регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

Научная новизна.

1. Предложен метод многоуглового сканирования для регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка и создана установка, реализующая этот метод.

2. Получено выражение для определения оптимального количества проекций, позволяющего получать достоверные пространственные энергетические распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка за минимальное время.

3. Впервые реализована регистрация профилей пучка под разными углами с помощью сцинтилляционного проволочного детектора, на основе которых с помощью интегральных преобразований получено пространственное энергетическое распределение ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработанный метод многоуголового сканирования позволяет получить пространственное энергетическое распределение ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка с помощью обратного преобразования Радона.

2. Полученное выражение для поиска оптимального количества проекций позволяет оптимизировать процесс сбора данных при реализации метода многоуглового сканирования.

3. Созданный макет экспериментальной установки позволяет эффективно применять метод многоуглового сканирования для регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Многоугловое сканирование с интегральным преобразованием (обратным преобразованием Радона) его результатов обеспечивают достоверную регистрацию пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

2. Без учета погрешностей узлов экспериментальной установки оптимальное количество проекций для достоверной регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка за минимальное время равно 10.

3. Методом многоуглового сканирования на основе сцинтилляционного проволочного детектора при оптимальном количестве проекций 18 с разрешением не хуже 2х2 мм^2 регистрируется пространственное энергетическое распределение в поперечном сечении пучков электронов, пучков импульсных рентгеновских источников и рентгеновских источников непрерывного действия.

Достоверность и обоснованность результатов.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием современных программных пакетов и аппаратуры, согласием результатов измерений, полученных разными методами и устройствами, и непротиворечивостью полученных результатов ранее опубликованным работам других авторов.

Апробация.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих научных мероприятиях:

1. International conference on Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences, г. Ереван, Армения, 2019.
2. 14th International Forum on Strategic Technology «IFOST-2019», г. Томск, Россия, 2019.
3. XIII International Symposium «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» (RREPS-19), г. Белгород, Россия, 2019.
4. XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, Россия, 2019.
5. I Trans-Siberian school on High Energy Physics, г. Томск, Россия, 2019.
6. The 8th International Conference «Channeling 2018 – Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena», о. Искья, Италия, 2018.
7. RACIRI Summer School 2018, о. Рюген, Германия, 2018.

8. VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири, г. Томск, Россия, 2018.

9. II Trans-Siberian School on High Energy Physics, г. Томск, Россия, 2019.

10. XII International Symposium «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» (RREPS-17), г. Гамбург, Германия, 2017.

11. XII Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева, г. Алушта, Россия, 2017.

12. IX Международная научно-практическая конференция, посвященная 50-летию исследовательского ядерного реактора ТПУ «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине», г. Томск, Россия, 2017.

13. VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири, г. Томск, Россия, 2016.

Личный вклад.

Личный вклад автора состоит в выборе методов исследований, разработке программного обеспечения для сбора данных, разработке экспериментальных установок, проведении экспериментальных исследований, интерпретации полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке научных публикаций по теме исследования. Постановка задач исследования и анализ полученных результатов проводились совместно с научным руководителем. Результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Вклад соавторов в основные публикации не превышал 30% от общего объема работы.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, из них 1 статья в изданиях, включенных в список ВАК, 5 статей в зарубежных изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science, 7 материалов конференций. В рамках выполнения работы получен акт о внедрении результатов научных исследований и свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы, содержащего 132 библиографические ссылки. Общий объем диссертации составляет 118 страниц и включает 68 рисунков и 10 таблиц.

Краткое содержание диссертации

В **первой главе** проведен литературный обзор по тематике исследования. Были рассмотрены как общепринятые методы регистрации пространственных характеристик пучков ионизирующего излучения, так и современные исследования в данной области. Описаны широко используемые методы детектирования, основанные на процессе люминесценции вещества под воздействием ионизирующего излучения, на вторичной эмиссии заряженных частиц, на комптоновском рассеянии фотонов при взаимодействии с пучком заряженных частиц, на когерентности синхротронного излучения, которое генерируется в процессе ускорения электронов, на переходном излучении, которое генерируется при прохождении заряженной частицы на границе раздела двух сред с разной диэлектрической проницаемостью. Рассмотрены преимущества и недостатки существующих методов. Рассмотрены современные исследования в области диагностики характеристик пучков ионизирующего излучения, в том числе для медицинских приложений. Рассмотрены исследования по использованию метода обратного преобразования Радона данных в области диагностики пучков ионизирующего излучения.

В результате проведенного литературного обзора была обозначена цель диссертационного исследования: разработка и эффективное применение метода многоуглового сканирования для регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

Во второй главе диссертационной работы описывается концепция метода многоуглового сканирования для регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка. Для восстановления двумерного распределения из набора данных, полученных в процессе

многоуглового сканирования пучка, используются методы томографической реконструкции, основные принципы которых описаны в разделе 2.2. Также в данном разделе были выбраны критерии оценки реконструированных изображений – среднеквадратичное отклонение, представленное в дискретном виде, и евклидово расстояние. На основе математического пакета MatLab проведен расчетный эксперимент, в котором получены реконструкции распределений характерных для энергетических распределений ионизирующего излучения в поперечном сечении при разных количествах проекций. Было получено выражение для поиска оптимального количества измерений профиля пучка под разными углами для достоверной реконструкции энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка за минимальное время.

Третья глава описывает процесс разработки и испытания экспериментальных установок для регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка методом многоуглового сканирования. На первом этапе разработано устройство в виде металлического проволочного детектора с тонкими полосками, расположенными под разными углами относительно друг друга. С помощью данного устройства проведен эксперимент, который показал возможность применения данного метода. Однако, высокие электромагнитные наводки, генерируемые в металле, привели к возникновению большого количества артефактов при реконструкции и полученные результаты позволили лишь оценить наличие «горячих» и «холодных» пятен, а не полноценное энергетическое распределение электронов в поперечном сечении пучка электронного пучка. Во избежание данного фактора было предложено использовать оптический детектор. Первоначально, в качестве детектирующего элемента, был выбран оптоволоконный кабель, в теле которого под действием высокоэнергетичных электронов генерируется вторичное излучение (излучение Вавилова-Черенкова, переходное излучение, тормозное излучение). На основе такого детектора было проведено экспериментальное исследование по регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка. Полученные результаты показали, что преимущественно при таком измерении в

оптоволокне генерируется излучение Вавилова-Черенкова, интенсивность которого возрастает в случае, когда электроны входят в материал детектора под углом близким к черенковскому. В связи с этим, интенсивность излучения Вавилова-Черенкова увеличивается на краях пучка. Далее была разработана детектирующая система на основе сцинтилляционной полоски, в теле которой под действием ионизирующего излучения генерируются световые фотоны. В эксперименте на выведенном электронном пучке Микротрона ТПУ были получены результаты, которые позволяют измерить размеры пучка и оценить форму. В заключении главы было проведено сравнение среднеквадратичных отклонений и евклидовых расстояний, полученных в экспериментах с разными детектирующими системами, и принято решение о дальнейшем использовании детектора на основе сцинтиллятора.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям по апробации метода многоуглового сканирования с помощью экспериментальной установки, основанной на применении сцинтилляционного элемента. Для оценки работоспособности метода было принято решение использовать «стабильные» пучки. В данной работе пучок считался «стабильным», если энергетическое распределение ионизирующего излучения в его поперечной плоскости меняется за время проведения измерения не более чем на 5%. Помимо того, что в данной главе использовались «стабильные» пучки, они также имели сложную форму, так как в третьей главе было показано, что энергетическое распределение излучения в поперечном сечении коллимированного пучка круглой формы можно измерить даже с учетом множества факторов, оказывающих негативный эффект на результат измерения. Было определено оптимальное количество проекций для экспериментальной установки на основе сцинтилляционного проволочного детектора. Эксперименты проводились на импульсном рентгеновском пучке с характерными размерами 20х20 мм^2, на электронном пучке с характерными размерами 50х50 мм^2, на рентгеновском пучке постоянного действия с характерными размерами 20х20 мм^2. Результаты экспериментов показали возможность регистрации энергетического распределения ионизирующего

излучения в поперечном сечении пучка с разрешением обусловленным толщиной сцинтилляционной полоски, которое составило 2x2 мм^2.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОПРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПУЧКОВ

Постоянное расширение области применения пучков ионизирующего излучения, а также развитие способов их генерации требуют разработку новых усовершенствованных методов для их диагностики. Новые методы определения параметров пучков ионизирующего излучения позволяют увеличивать точность их диагностики и могут позволить получить конкурентоспособные результаты современных фундаментальных исследований, а также решать прикладные задачи. Осуществлять контроль параметров пучков ионизирующего излучения необходимо на различных этапах работы с ускорительной техникой, таких как ввод в эксплуатацию нового или усовершенствованного ускорителя, в ходе регулярной работы, а также для оптимизации или поиска необходимых параметров пучка в соответствии с поставленной задачей. Системы диагностики пучков позволяют исследовать свойства и параметры пучка как в ускорителе, так и на выходе из него. Все вышесказанное приводит к постоянной необходимости в новых методах контроля характеристик пучков, которые были бы быстродейственными, невозмущающими, универсальными и высокоточными.

Одним из важных пространственных параметров пучков ионизирующего излучения является энергетического распределение излучения в поперечном сечении.

1.1 Люминесцентные детекторы

Впервые детектор, основанный на эффекте люминесценции, был применен для открытия рентгеновского излучения В. Рентгеном в 1895 году [1]. Далее с момента развития ускорительной техники и по сей день наиболее распространенным подходом к регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в физическом эксперименте и других областях науки и техники является применение люминофорных материалов [2-14]. Принцип работы такого метода детектирования пучка основан на том, что при попадании

ионизирующего излучения на люминофорный материал атомы вещества поглощают энергию и происходит передача ее части центрам люминесценции с их возбуждением в излучающее состояние, после чего происходит возврат центров люминесценции в основное состояние с эмиссией фотонов. По механизму протекания процессов при люминесценции, ее можно разделить на резонансную, спонтанную, вынужденную и рекомбинационную. Схема переходов при разных видах люминесценции представлена на рисунке 1.1. На рисунке 1.1 уровень E_0 является основным, E_1 и E_2 – возбужденными, M – метастабильным, символом «↑» обозначено поглощение кванта, а «↓» обозначена люминесценция, пунктирной стрелкой обозначен безызлучательный переход.

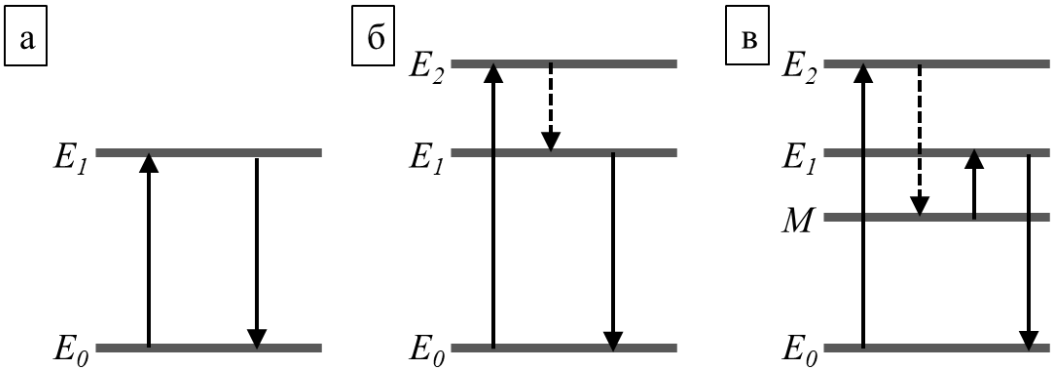

Рисунок 1.1 – Схема переходов при разных видах люминесценции:
а – резонансной, б –спонтанной, в – вынужденной

Резонансная люминесценция – это процесс, при котором поглощенный квант и квант люминесценции равны (рисунок 1.1 а). Спонтанная люминесценция – это процесс, при котором квант люминесценции меньше поглощенного кванта, так как при переходе из возбужденного состояние в основное частица передает часть своей энергии окружающем частицам в виде тепла (рисунок 1.1 б). Вынужденная люминесценция – это процесс, при котором, как и при спонтанной люминесценции возбужденная частица передает часть своей энергии окружающим частицам, но при этом попадает не на другой возбужденный уровень, а на метастабильный уровень, с которого переход на основной запрещен, таким образом, необходимо сообщить частице дополнительную световую или тепловую энергию для перехода на возбужденный уровень с которого уже возможен переход на основной (рисунок

1.1 в). Рекомбинированная люминесценция – это процесс, при котором на заключительном этапе передачи энергии происходит рекомбинация [2].

Обычно, детекторы, основанные на процессе люминесценции, представляют собой экран, на который может быть нанесена координатная сетка. Датчики этого типа могут изготавливаться следующими методами:

1) Метод напыления люминофорного порошка на металлическую подложку. Такие датчики называются порошковые [3-7]. Они широко применяются благодаря их экономичности и универсальности. Разрешение измерения параметров пучка с использованием таких детекторов ограничено средним размером зерна и зачастую составляет несколько десятков микрон.

2) Метод спекания люминофорного порошка на подложке. Такие устройства называются керамические люминофорные экраны [8-10]. В связи с тем, что зерна люминофора связаны, пространственное разрешение соответствует размерам нескольких зерен и обычно составляет 100 мкм.

3) Использование органических полимерных материалов в качестве люминофорного материала. Такие датчики называются полимерными [11]. Такие детекторы обладают высоким быстродействием и световыходом, однако под действием высокоэнергетического ионизирующего излучения разрушаются длинные молекулы органических материалов, что ограничивает их применимость.

4) Использование монокристаллических сцинтилляторов в качестве люминофорных экранов. Данный метод диагностики пучков был предложен еще в 80-х годах прошлого столетия [12-14], однако, не нашел широкого применения в связи с дороговизной таких материалов. В последние 10 лет стоимость таких кристаллов значительно снизилась благодаря развитию лазерной промышленности, что привело к значительному росту применения сцинтилляционных кристаллов в качестве люминофоров [14]. К неоспоримым преимуществам применения таких детекторов для измерения пространственных характеристик пучка можно отнести:

– высокое пространственное разрешение, которое может достигать значений в 1 мкм;

– хороший световыход;

– высокая радиационная стойкость материалов;

– возможность эффективного использования в условиях высокого вакуума.

К дополнительным преимуществам использования такого метода измерения профилей пучков ионизирующего излучения можно отнести простоту их изготовления и использования, а также достаточно высокое пространственное разрешение, однако, метод имеет и ряд недостатков, к которым относятся, в первую очередь, высокое возмущающее воздействие на пучок, во вторую – недолговечность, в связи с повреждением экранов под действием тепловых, электрических и радиационных нагрузок.

1.2 Сканирующие детекторы

Для измерения характерных размеров пучков используются различные сканирующие детекторы, в том числе вторично-эмиссионные сканеры, лазерные сканеры и детектор, основанный на характеристическом излучении.

Существует широко применяемый метод измерения профилей и размеров пучков заряженных частиц основан на вторичной эмиссии заряженных частиц на металле. Такой метод регистрации горизонтального и вертикального энергетического распределения пучка стал применяться в 60х годах предыдущего столетия и пришел на замену ионизационному методу, который заключался в измерении заряда, пришедшего на металлическою сетку при попадании ионизирующего излучения в область между сеткой и электродом, заполненную газом. Ионизационные детекторы оказались абсолютно непрозрачными, что и привело к его вытеснению детекторами, основанными на вторичной эмиссии. Впервые метод измерения профиля электронного пучка с помощью проволочного сканирования, основанного на вторичной эмиссии электронов был описан японскими учеными в работе [15]. Принцип работы таких детекторов основан на том, что при взаимодействии проволоки с пучком, в материале детектирующей полоски скапливается электрический заряд, по величине которого можно

определить количество частиц, попавших в тело датчика. Вторичная электронная эмиссия является результатом совокупности процессов, происходящих в твердом теле под действием ионизирующего излучения. Электроны вещества, поглотившие энергию пришедшего излучения, могут выбивать вторичные электроны, передавать энергию на возбуждение плазменных колебаний или на взаимодействие с кристаллической решеткой. Вторичные электроны могут быть выбиты из валентной зоны или зоны проводимости, также из внутренних оболочек атомов (δ-электроны) или могут быть выбиты в два этапа с внутренних оболочек (Оже-электроны). Подробно теория вторичной электронной эмиссии описана во многих источниках, некоторые из которых далее приведены [16-18].

Одним из самых распространенных детекторов, основанных на вторичной эмиссии, является проволочное сканирование. Измерение профиля пучка с помощью такого детектора производится путем движения тонкого металлического электрода в плоскости перпендикулярной оси распространения пучка. В процессе движения измеряется ток вторичных электронов, который пропорционален количеству излучения попавшего в тело детектора в единицу времени. Для примера на рисунке 1.2 представлен проволочный сканер, который используется для одновременного определения горизонтального и вертикального профилей электронного пучка с энергией до 200 МэВ на инжекторе LEP CERN (Большой электрон-позитронный коллайдер) [19].

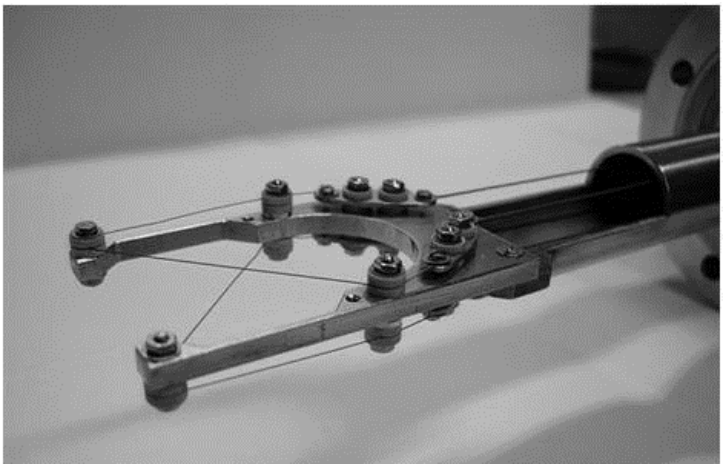

Рисунок 1.2 – Проволочный сканер инжектора LEP

К детекторам, основанным на вторичной эмиссии электронов, можно отнести сетчатые датчики. Такие устройства представляют собой набор металлических проволочек или полосок, расположенных в виде сетки. Для отвода вторичных электронов в конструкцию датчика включены высоковольтные электроды. На рисунке 1.3 показан внешний вид сеточного датчика, использующегося в ускорительном комплексе CERN [19]. Такой датчик используется как для электронов, так и для протонов. В работе [19] показаны результаты измерения профиля протонного пучка с энергией 50 МэВ на ускорителе LINAC2 с помощью данного сетчатого датчика.

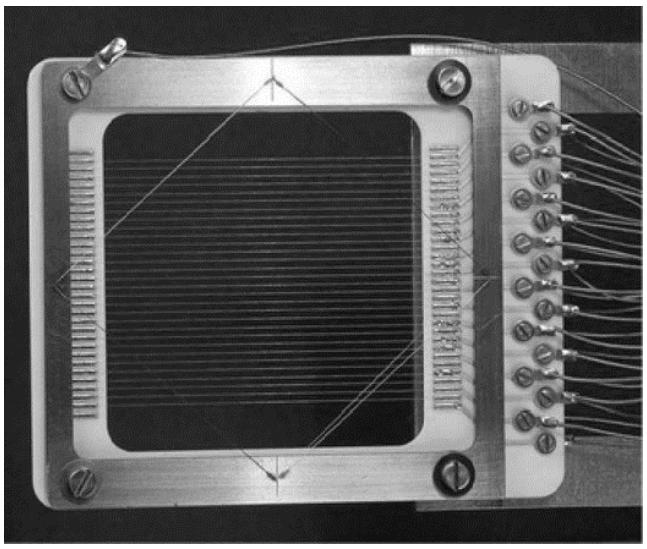

Рисунок 1.3 – Внешний вид сетчатого датчика, использующегося в ускорительном комплексе CERN

К преимуществам такого метода можно отнести его относительную прозрачность и простоту проведения измерения. Однако, использование такого метода может дать представление только о размерах пучка, а не о распределении его интенсивности в поперечном сечении.

Помимо измерений профиля пучка с помощью вторичной электронной эмиссии в физических экспериментах широко применяются приборы для диагностики пучка на основе комптоновского рассеяния, например, детектирующие системы такого принципа действия описаны в работах [20-26]. Такой метод измерения называют лазерным сканированием. Принцип измерения

профиля пучка основан на эффекте рассеяния фотонов на пучке заряженных частиц. Схема работы такого устройства представлена на рисунке 1.4.

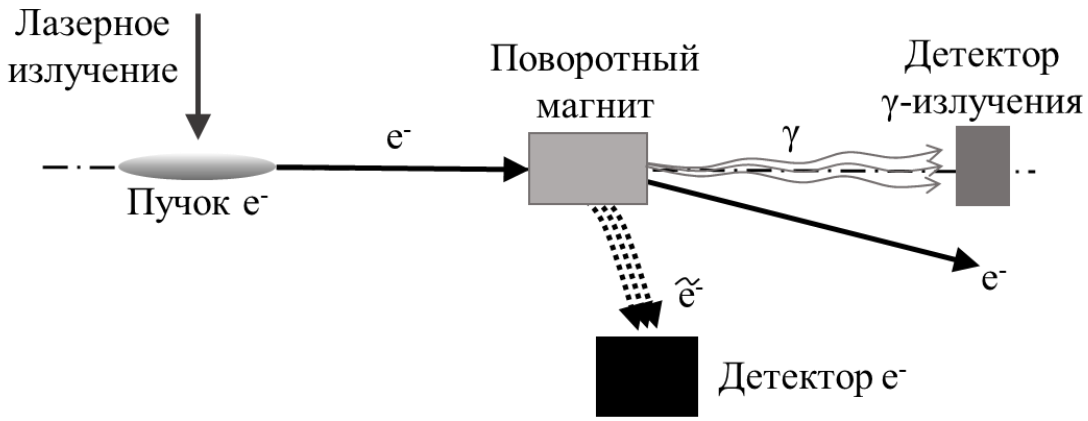

Рисунок 1.4 – Схема измерения характеристик пучка с помощью лазерного сканера

Измерение профиля пучка с помощью устройства, показанного на рисунке 1.4, осуществляется следующим образом: перпендикулярно оси распространения электронного пучка (e^-) направляется лазерное излучение, при взаимодействии электронов с которым генерируются комптоновские фотоны (γ), которые распространяются по направлению движения первичного пучка, при этом часть электронов рассеивается ($\tilde{e}^-$). Далее на пути движения излучения установлен поворотный магнит, который отклоняет пучок заряженных частиц, при этом рассеянные частицы ($\tilde{e}^-$) за счет меньшей энергии отклоняются сильнее и регистрируются детектором, комптоновские фотоны не отклоняются и попадают в детектор установленный по пути их движения. Как показано на рисунке 1.5, лазерный луч можно разделять с помощью системы зеркал, что позволяет проводить измерения профиля пучка сразу в двух направлениях: горизонтальном и вертикальном.

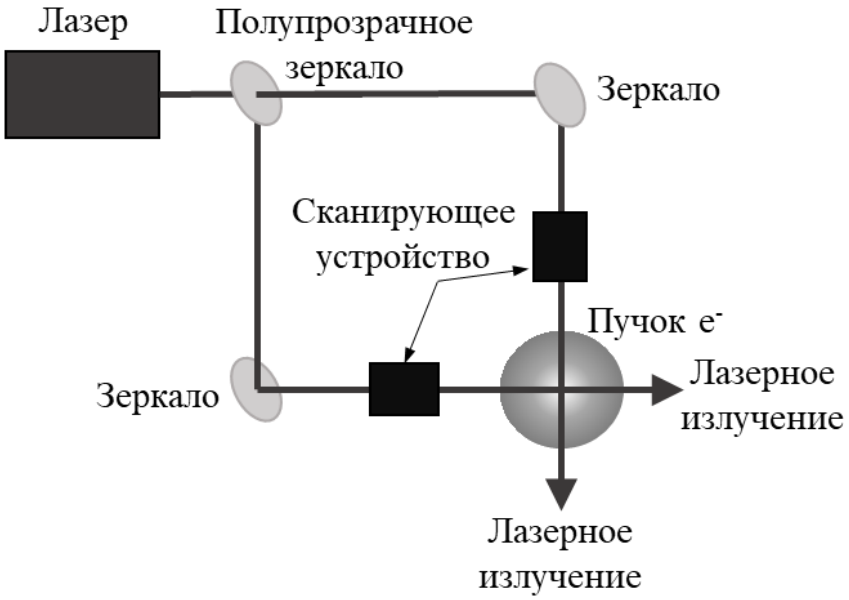

Рисунок 1.5 – Схема разделения лазерного луча, предназначенного для сканирования пучка в двух направлениях

Лазерные сканеры предназначены в основном для измерения профиля высокоэнергетичных пучков электронов [19-24] и ионов [25-26] с поперечными размерами более 350 нм.

В работе [27] авторами был показан способ измерения характеристик электронных пучков на основе проволочного сканирования путем измерения спектров вторичного рентгеновского излучения. Интенсивность первичного пучка пропорциональна интенсивности характеристического рентгеновского излучения. Таким образом, по изменению характеристической линии спектра при перемещении проволоки определяют пространственные характеристики пучков.

1.3 Оптические методы детектирования пучков ионизирующего излучения

Помимо вышеописанных методов, на сегодняшний день в физике высоких энергий широкое распространение нашли оптические методы измерения пространственных характеристик пучков относительно малых размеров (десятки микрон и менее). Так как данная работа направленна на измерение профилей пучков относительно больших размеров (единицы миллиметров и более) оптические методы будут рассмотрены достаточно кратко.

Для измерения профиля пучка используют лазерный интерферометр. Впервые такое устройство было предложено и апробировано научной группой Stanford Linear Accelerator Center, США [28]. Принцип действия лазерного интерферометра также основан на комптоновском рассеянии фотонов при взаимодействии с пучком заряженных частиц. На рисунке 1.6 представлена оптическая система для формирования лазерного излучения.

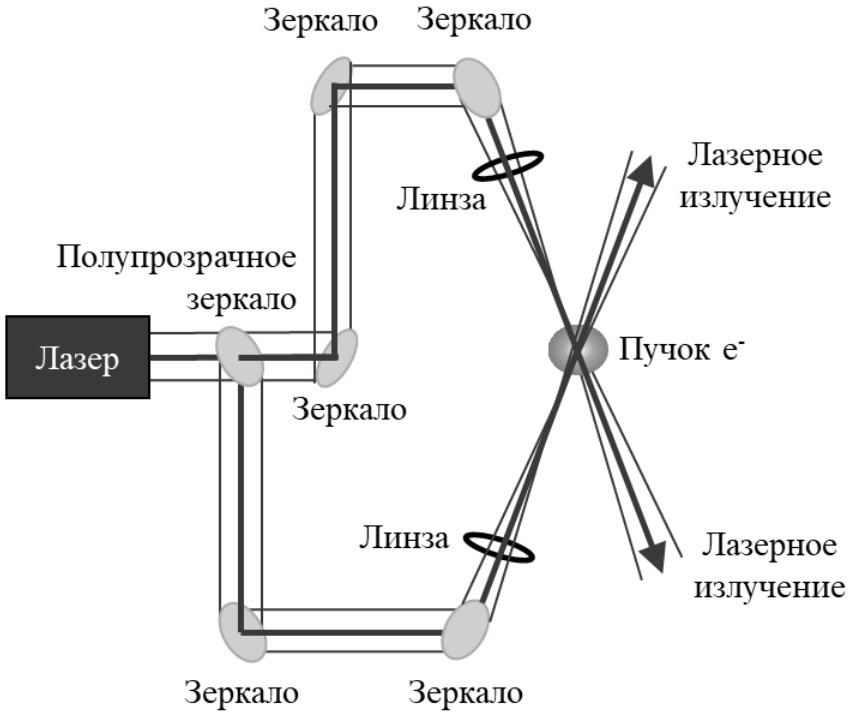

Рисунок 1.6 – Оптическая система для формирования лазерного излучения, предназначенного для измерения характеристик пучка с помощью интерферометра

На рисунке 1.7 представлена схема измерения характеристик пучка с помощью такого устройства.

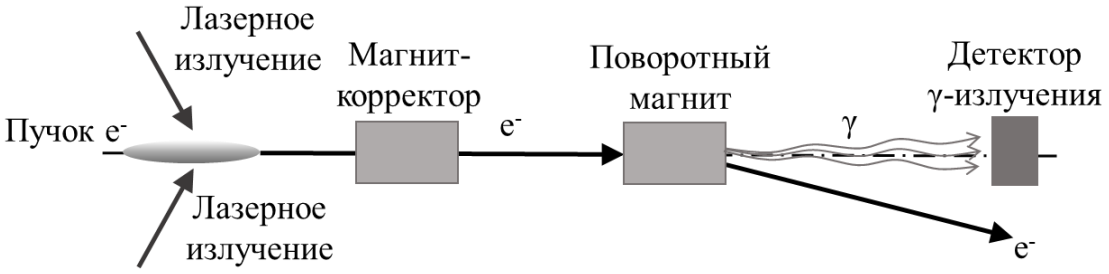

Рисунок 1.7 – Схема измерения характеристик пучка с помощью лазерного интерферометра

С помощью системы зеркал лазерный луч разделяется на два (рисунок 1.6), которые направляются друг на друга и фокусируются на пути распространения пучка. Как показано на рисунке 1.7 перед взаимодействием с лазерным излучением положение пучка корректируется магнитом корректором. При взаимодействии электронов (e^-) с полями лазерных лучей, образуются комптоновские фотоны (γ), на основании детектирования которых и составляется интерференционная картина. При этом необходимо, чтобы поперечный размер пучка был много меньше периода интерференционных полос, тогда количество комптоновских гамма-квантов пропорционально яркости интерференционной картины в конкретной точке [29]. Таким образом, данный метод применяется только для пучков с малыми поперечными размерами.

Одним из оптических детекторов, применяемых для регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка является ПЗС-матрица [30]. Такой детектор состоит из матрицы полупроводниковых датчиков, размеры которых составляют единицы-десятки микрон, и электродов, благодаря которым создается потенциальная яма, в которой скапливается заряд, благодаря стеканию в нее электронов из валентной зоны, возбужденных световыми фотонами. Зачастую определение положения и размеров пучков с помощью ПЗС-матриц происходит по синхротронному или переходному излучению. Синхротронным излучением называют излучение, генерирующееся электронным пучком при изменении его направления под действием магнитного поля, а переходное, в свою, очередь генерируется на границе раздела двух сред с разной диэлектрической проницаемостью.

Также для регистрации поперечного распределения интенсивности пучков используют интерферометры. Данный метод основан на пространственной когерентности синхротронного излучения электронного пучка малых размеров. Для получения хорошего качества интерферограмм используются узкополосные оптические фильтры и зеркальная оптика, что усложняет систему детектирования. В работах [31-37] представлены современные исследования, направленные на развитие таких систем.

1.4 Методы регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучков относительно больших размеров

Широкоаппертурные пучки (пучки, размеры которых относительно велики и составляют единицы миллиметров и более) применяются во многих областях, таких как неразрушающий контроль больших объектов, лучевая терапия, стерилизация медицинских объектов и других. Контроль энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка при проведении процедур лучевой терапии и диагностики является неотъемлемой их частью. В современной клинической практике для измерения пространственных характеристик пучков ионизирующего излучения используются матричные детекторы, состоящие из нескольких ионизационных камер [38-41] или полупроводниковых элементов [41, 42], которые размещены на плоскости или внутри фантома. Количество детектирующих элементов на таких устройствах позволяет обеспечить пространственное разрешение около 7х7 мм^2 – 10х10 мм^2 [40, 41]. На том же принципе основано применение флуоресцентных экранов в сочетании с системой оптических камер [43-46]. Измерение характеристик пучка такими устройствами занимает доли секунд, однако такие подходы являются возмущающими и в большинстве случаев в процессе измерения пучок полностью поглощается детектирующей системой.

Также в последние годы для диагностики медицинских пучков всё чаще исследуется возможность применения детекторов на основе сцинтилляционных материалов. К преимуществам использования пластиковых сцинтилляционных детекторов в клинической дозиметрии можно отнести их тканеэквивалентность и высокую чувствительность [47, 48]. Ряд исследований по применению таких детекторов для клинической дозиметрии сеансов дистанционной лучевой терапии представлены в работах [49-54], для клинической дозиметрии сеансов контактной лучевой терапии представлены в работах [55-57]. Помимо возможности их применения для абсолютной дозиметрии [58, 59], в работах [60, 61] на основе сцинтилляционного экрана и CCD-камеры был разработан детектор для

регистрации распределения интенсивности протонов в поперечном сечении терапевтического пучка.

Другой подход к регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка основан на использовании материалов, которые меняют свои свойства при взаимодействии с излучением, например, пластины или пленки [62-64]. Впервые в 1985 году Рентген применил фотопластинку для регистрации рентгеновского излучение, также данный метод регистрации ионизирующего излучения позволил Беккерелю в 1896 году открыть явление радиоактивности. Уже в 30-х годах предыдущего столетия были получены специальные ядерные эмульсии, которые позволили регистрировать треки ядерных частиц. Пленочные дозиметры для индивидуального контроля были изобретены в 1942 году [1]. На сегодняшний день данные методы обладают высоким разрешением, однако наличие расходных материалов не только повышает эксплуатационную стоимость данных устройств, но и требуют контроля параметров сменных элементов, например, проводить дополнительную калибровку для каждой партии детекторов. Кроме того, данный подход также является возмущающим и ведет к сильному изменению характеристик первичного пучка.

1.5 Применение методов реконструкции для определения параметров пучков заряженных частиц

Применение методов томографической реконструкции для задач диагностики пучков было показано в 2016 году в работах научной группы, проводящей исследования в Объединённом институте ядерных исследований (г. Дубна, Россия) под руководством Жабицкого В.М. Данный цикл работ [65-67] посвящен возможности томографической реконструкции продольного распределения ионов в банче и показывает хорошие предварительные результаты при моделировании. Другая научная группа из факультета синхротронного излучения ALBA – CELLS (г. Барселона, Испания) под руководством Л. Торино исследовала возможность реконструкции профиля пучков заряженных частиц с помощью интерферометра, детектирующего синхротронное излучение [68].

Данная работа показывает возможность определения профилей пучков эллиптической формы на основе четырех интерферограмм, полученных при разных положениях отверстий детектора. Реконструкция производится по рассчитанным в работе коэффициентам. Помимо этого, авторами показана возможность измерения профиля ультрамалых пучков заряженных частиц. Однако, данный метод не позволяет проводить измерения пространственных характеристик пучков, имеющих форму отличную от эллиптической.

Основные требования к современным методам регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка заключаются в следующем: достаточное пространственное разрешение результатов измерения; малое время набора и обработки данных; минимизация возмущения пучка в процессе измерения. Большинство подходов, описанных выше, не отвечают совокупности всех этих требований. Помимо этого, существует проблема высокоточного измерения пространственных характеристик широких пучков, поперечные размеры которых составляют 20 см и более. Поля таких размеров применяются как в лучевой терапии, так и для радиационной стерилизации.

В связи с этим существует необходимость разработки метода, позволяющего создавать устройства, которые будут регистрировать энергетическое распределение ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка с высоким пространственным разрешением в режиме реального времени, с минимальными потерями ионизирующего излучения в рабочем теле детектора. Такой метод не должен предполагать использование расходных материалов, которые необходимо заменять после одного или нескольких измерений, при этом система должна быть устойчива к внешним электромагнитным возбуждениям, которые характерны при работе ускорительной техники. Таким образом, целю диссертационного исследования стала разработка и эффективное применение метода многоуглового сканирования для регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПУЧКА МЕТОДОМ МНОГОУГЛОВОГО СКАНИРОВАНИЯ

В данной главе диссертационной работы подробно описана концепция разрабатываемого метода регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка, который основан на реконструкции данных, полученных в процессе многоуглового сканирования. Описаны принципы математической реконструкции и выбраны критерии для количественной оценки полученных изображений. После чего с помощью программного пакета MatLab получен набор профилей нескольких распределений и определено оптимальное количество проекций, необходимых для достоверной реконструкции данных за минимальное время.

2.1. Концепция метода многоуглового сканирования для регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка

Разрабатываемый в диссертационной работе метод и регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка основан на реконструкции данных, полученных в процессе многоуглового сканирования. На рисунке 2.1 представлена схема регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка на основе многоуглового сканирования.

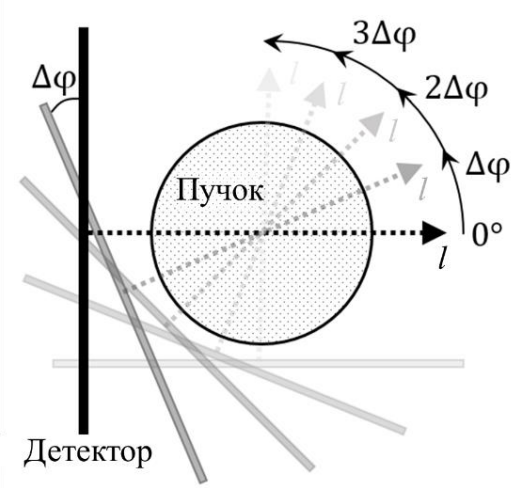

Рисунок 2.1 – Схема регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка методом многоуглового сканирования

Регистрация энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка осуществляется при помощи реконструкции зависимости интенсивности излучения от координат в измеряемой плоскости $I_0(x, y)$ из зависимости интенсивности излучения, попавшего в детектор, от его положения $I(l,\varphi)$. Для получения таких зависимостей необходима сканирующая детектирующая система, позволяющая перемещать детектор в измеряемой плоскости. Перемещение должно производится поступательно в измеряемой плоскости перпендикулярно распространению пучка в направлении l. После этого угол сканирования φ меняется на заданное значение и измерение повторяется. При помощи математической реконструкции из набора таких данных вычисляется энергетическое распределение пучка в поперечном сечении I_0.

2.2. Математическая реконструкция и определение критерия оценки реконструированных изображений

Математическая задача реконструкции энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка из профилей, полученных при поперечном перемещении детектора под разными углами, является задачей интегральной геометрии о восстановлении функции двух переменных по ее интегралам вдоль прямых, которая была решена еще в начале прошлого столетия австрийским математиком Иоганном Радоном [69].

Преобразования Радона за последние сто лет были неоднократно описаны в книгах и работах физиков и математиков, далее будут приведены некоторые из них [70-72]. Преобразования Радона были модифицированы и определены как для двумерных, так и для многомерных случаев. Однако, в соответствии с решаемыми в диссертационной работе задачами далее будут рассмотрены преобразования только для случая двумерного пространства. Таким образом, преобразования Радона для случая двумерного пространства позволяют определить интеграл от функции $g(x, y)$ вдоль прямой AB, перпендикулярной $\vec{n} = (\cos\varphi, \sin\varphi)$, и проходящим на расстоянии l от начала координат по формуле:

$$f(l,\varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\sqrt{l^2 + p^2}, \varphi + \arctan(p/l))dp. \quad (2.1)$$

При этом функция $g(x,y)$ должна быть определена на плоскости и достаточно быстро убывающей на бесконечности, то есть несобственный интеграл такой функции должен быть сходящимся. Рисунок 2.2 представлен к пояснению формулы (2.1).

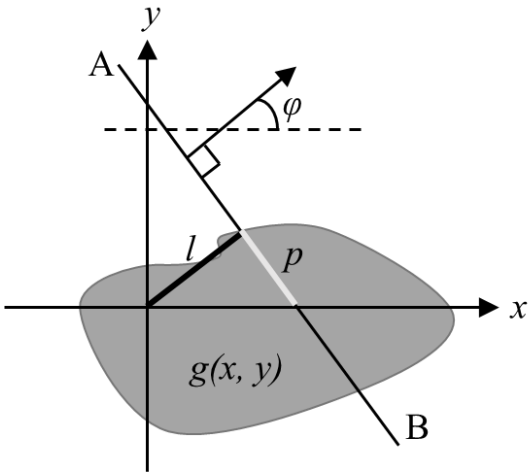

Рисунок 2.2 – К пояснению формулы преобразования Радона (2.1)

Для решения задач томографии из формулы (2.1) может быть получена формула обращения двумерного преобразования Радона, функция которой представлена в полярных координатах (ψ, r):

$$g(\psi,r) = \frac{1}{4\pi^2}\int_0^{2\pi}\left(\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{1}{r\cos(\varphi-\psi)-l}\frac{\partial}{\partial l}f_\varphi(l)dl\right)d\varphi, \quad (2.2)$$

где – ψ угол между положительным направлением оси X и вектором $\vec{r}$, r – модуль вектора $\vec{r}$, $f_\varphi(l)$ – одномерная проекция функции $g(\vec{r})$, полученная под углом φ.

Формула (2.2) является одной из основных для двумерной томографии. Она может быть интерпретирована следующим образом. Каждая одномерная проекция фильтруется посредствам фильтра высоких частот, который в Фурье-пространстве представляется умножением на модуль частоты [73]. Вслед за этим производится интегрирование по вектору направлений – обратное проецирование. Поэтому алгоритмы, непосредственно реализующие формулу (2.2), называют двумерными алгоритмами обратного проецирования с фильтрацией. Таких алгоритмов существует большое количество. Основное их отличие друг от друга – это способ построение фильтра.

Для оценки качества реконструированного изображения в данном разделе диссертационной работы и в дальнейшем будет использоваться общепринятый в методах реконструкции критерий [74-77] – среднеквадратичное отклонение интенсивности восстановленного изображения от истинного, определяемое следующим образом:

$$\sigma^2 = \frac{1}{s_0}\iint_{\Omega}\left(f_{\text{в}}(x,y) - f(x,y)\right)^2 dxdy, \qquad (2.3\text{а})$$

где $f_{\text{в}}(x,y)$ – функция интенсивности восстановленного изображения, $f(x,y)$ – функция интенсивности истинного изображения, s_0 – площадь области Ω.

Так как результат регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка методом многоуглового сканирования представляется в виде изображения с конечным числом пикселей, несущих информацию об интенсивности излучения в каждой точке (x_i, y_j), формула (2.3а) преобразуется в дискретный вид (2.3б):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N}\sum_{i,j}\left(f_{rec}(x_i, y_j) - f(x_i, y_j)\right)^2}, \qquad (2.3\text{б})$$

где M и N –горизонтальный и вертикальный размеры изображений в пикселях, $f_{\text{в}}(x_i, y_j)$ – значение интенсивности в точке (x_i, y_j) восстановленного изображения, $f(x_i, y_j)$ – значение интенсивности в точке (x_i, y_j) истинного изображения.

В расчетах в качестве контрольного изображения использовалось исходное распределение, в экспериментах – распределения, полученные с помощью широко применяемых на практике пленочных дозиметров. Нормированное среднеквадратичное отклонение при абсолютном совпадении изображений равно 0, при абсолютном несовпадении – 1.

Также для сравнения полученных результатов использовался общепринятый критерий для сравнения изображений – евклидово расстояние [78-80], которое позволяет количественно оценить различие двух изображений. Для получения данного критерия на первом этапе изображение представляется в виде гистограммы, которая представляет собой график статистического распределения элементов цифрового изображения с различной яркостью, в котором по

горизонтальной оси представлена яркость, а по вертикали – относительное число пикселей с конкретным значением яркости. Полученные гистограммы представляются в виде вектора и вычисляется евклидово расстояние по формуле:

$$\delta = \sqrt{\sum_k (m_k - e_k)^2}, \quad (2.4)$$

где m_k – количество пикселей с яркостью k первого изображения, e_k – количество пикселей с яркостью k второго изображения.

Евклидово расстояние при абсолютном совпадении изображений равно 0, при абсолютном несовпадении – корень из общего числа пикселей изображения. Для сопоставления результатов далее в работе δ будет нормироваться на 1. Во всех случаях пространственное разрешение результатов, полученных при помощи пленок, приводилось в соответствие с разрешением результатов, полученных разрабатываемым методом в каждом конкретном эксперименте.

2.3. Поиск оптимального количества проекций для реализации метода многоуглового сканирования пучка

Качество восстановления функции двух переменных по ее интегралам вдоль прямых зависит от количества исходных данных. С одной стороны, очевидно, что чем больше количество проекций, и соответственно меньше угол смещения, тем выше качество реконструированного изображения. С другой стороны, увеличение количества проекций приводит к увеличению времени сбора данных. В связи с этим, необходимо определить оптимальное количество сканирований, таким образом, чтобы качество реконструкции энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка оставалась достаточно высоким для его оценки при минимизации времени измерения.

Для оптимизации метода по количеству проекций необходимо провести численные эксперименты. Для этого с помощью программного пакета MatLab [81] были построены несколько изображений, после чего получены профили под разными углами. С использованием разного количества проекций были реконструированы тестовые изображения и проведены их сравнения.

2.3.1. Реконструкция распределения с одним максимумом и одним минимумом

На первоначальном этапе было выбрано тестовое распределение, которое характерно для пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка. Выбранное распределение имеет один максимум и один минимум, а его формула имеет следующий вид:

$$f(x,y) = x * e^{-x^2-y^2}. \quad (2.5)$$

Далее был построен трехмерный график функции (2.5) в программном пакете MatLab [81], который представлен на рисунке 2.3.

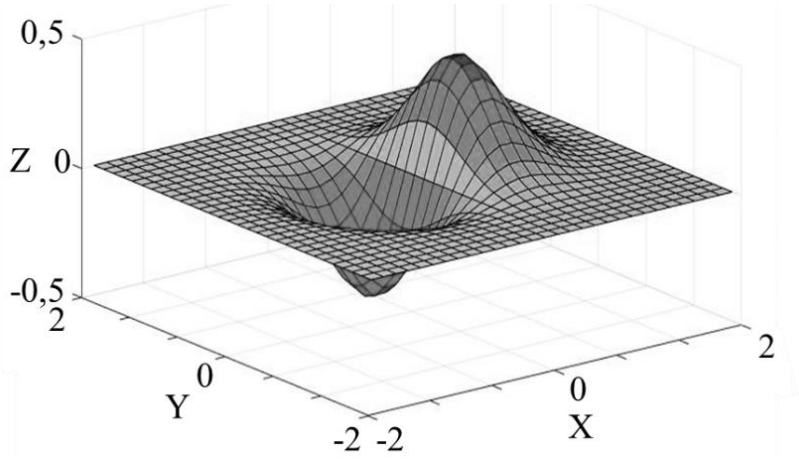

Рисунок 2.3 – Трехмерный график функции (2.5)

Для дальнейшей обработки данных, график функций (рисунок 2.3) необходимо преобразовать в черно-белое изображение, каждый пиксель которого будет соответствовать яркости цвета в градациях серого. Для этого будет применяться серая шкала, в которой на каждый пиксель используется один байт информации, то есть такая шкала может передавать 256 оттенков серого, таким образом, яркость цвета будет изменяться от 0 до 255. На рисунке 2.4 представлено двумерное изображение графика функции (2.4). На рисунке 2.4 минимальное значение Z тестового распределения (рисунок 2.3) соответствует интенсивности цвета равной нулю (черный цвет), при этом максимальное значение Z принимается равным 255 (белый цвет).

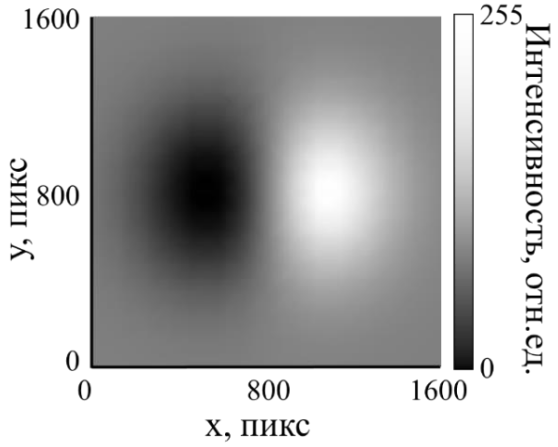

Рисунок 2.4 – Черно-белое изображение графика функции (2.5)

Из исходного изображения (рисунок 2.4) были получены двумерные проекции, таким образом, что значение в каждой точке составляет сумму интенсивностей (I_Σ) в столбце перпендикулярном прямой сканирования (l), угол с осью OX которой является углом смещения ($\Delta\varphi$) и задается в соответствии с необходимым количеством проекций с учетом того, что полный угол смещения должен быть не менее 180°. На рисунке 2.5 представлены несколько полученных профилей.

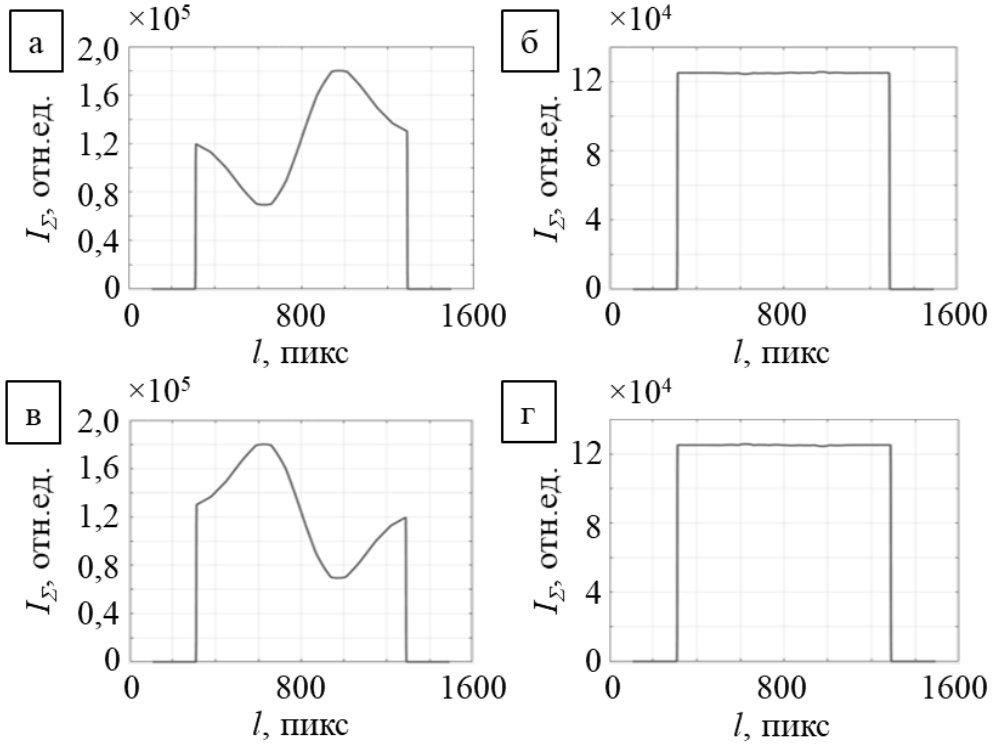

Рисунок 2.5 – Профили тестового изображения, полученные под углами:

а – φ = 0°; б – φ = 90°; в – φ = 180°; г – φ = 270°

Далее из полученных проекций при помощи обратного преобразования Радона реконструировались исходные данные. Для визуальной оценки качества реконструкции при разном количестве проекций на рисунке 2.6 представлены восстановленные изображения.

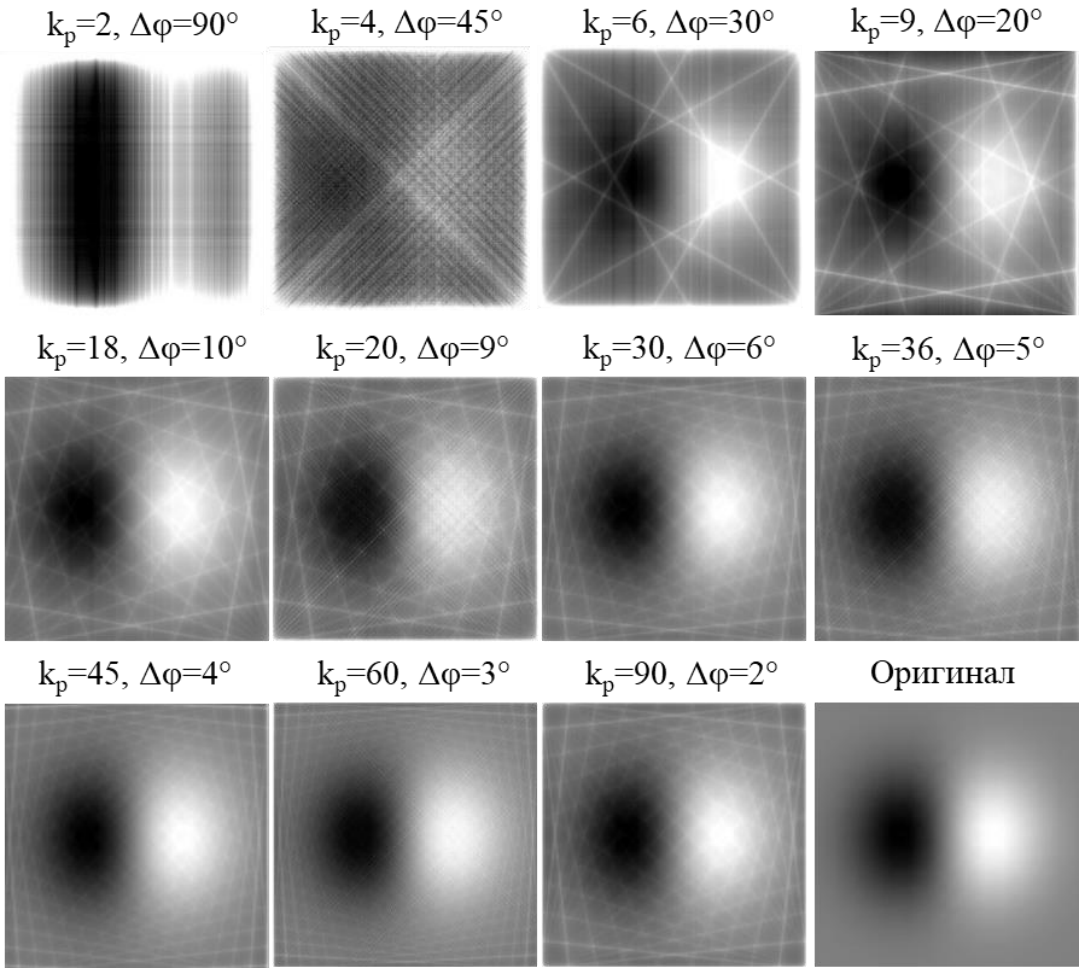

Рисунок 2.6 – Результаты реконструкции распределения с одним максимумом и одним минимумом обратным преобразованием Радона при разных количествах проекций k_p, полученных с угловым шагом Δφ

Все изображения, представленные на рисунке 2.6 были представлены в виде матриц интенсивностей с одинаковым количеством пикселей, после чего по формулам (2.3б) и (2.4) были рассчитаны критерии достоверности результатов для каждого восстановленного изображения. На рисунке 2.7 представлены графики зависимости σ и δ от количества проекций.

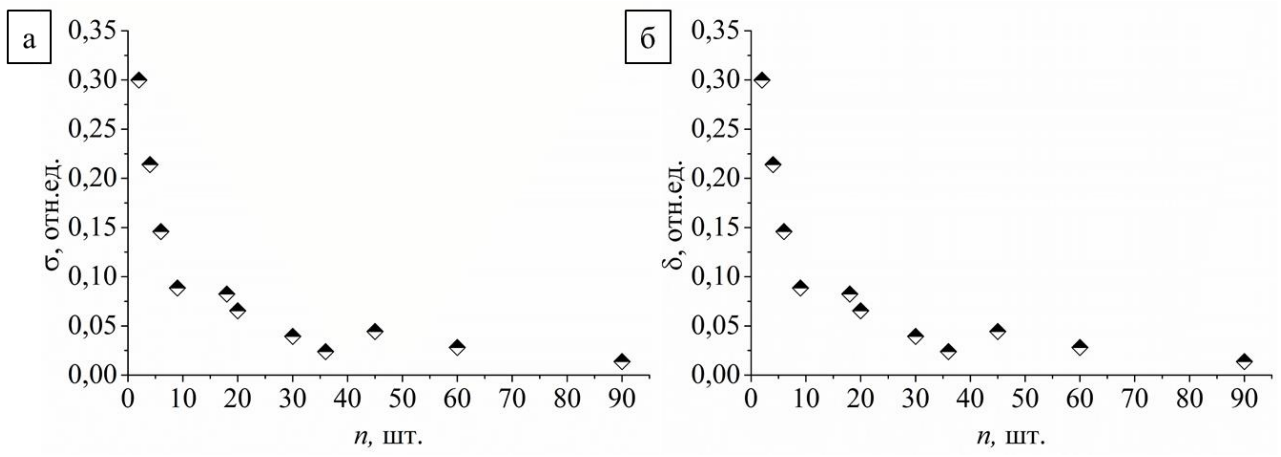

Рисунок 2.7 – Графики зависимости критериев качества реконструированных распределений с одним максимумом и одним минимумом от количества проекций: а – среднеквадратического отклонения, б – евклидова расстояния

Из рисунка 2.7 видно, что при количестве проекций меньше 10, значения σ и δ быстро убывают (изменяются на 85 процентов от первоначального значения), а при количестве проекций больше 15 значения выбранных критериев начинает убывать медленно, а именно от 15 до 90 проекций не более чем на 7%.

2.3.2. Реконструкция распределения с несколькими максимумами и минимумами

В качестве более сложного распределения было выбрано сложное гауссово распределение, формула которого имеет вид:

$$f(x,y) = 3(1-x)^2 e^{-x^2-(y+1)^2} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) e^{-x^2-y^2} - \frac{1}{3} e^{-(x+1)^2-y^2}. \quad (2.6)$$

Трехмерный график функции (2.6) представлен на рисунке 2.8.

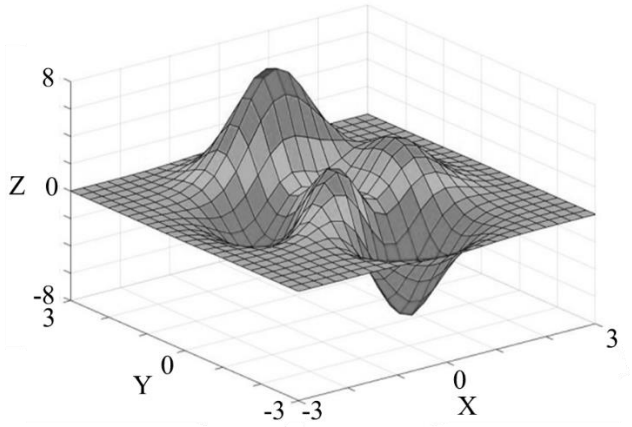

Рисунок 2.8 – Трехмерный график функции

Аналогично разделу 2.3.1 на рисунке 2.9 представлено двумерное изображение графика функции (2.6), представленного на рисунке 2.8, в котором минимальное значение Z соответствует яркости цвета равной нулю (черный цвет), при этом максимальное значение Z принимается равным 255 (белый цвет).

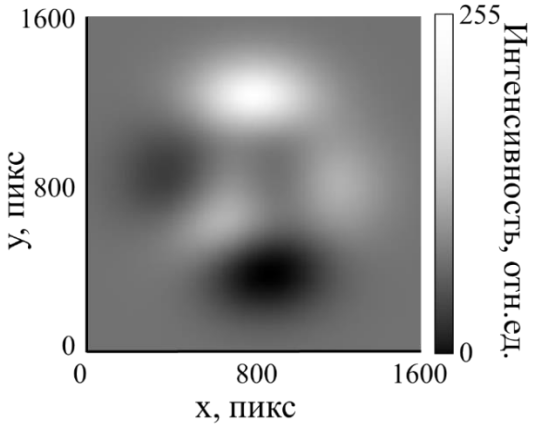

Рисунок 2.9 – Изображение графика функции

Далее, как и в разделе 2.3.1. из исходного изображения (рисунок 2.9) были получены двумерные проекции, таким образом, что значение в каждой точке составляет сумму интенсивностей (I_Σ) в столбце перпендикулярном прямой сканирования (l), угол с осью OX которой является углом смещения ($\Delta\varphi$). На рисунке 2.10 представлены несколько полученных профилей.

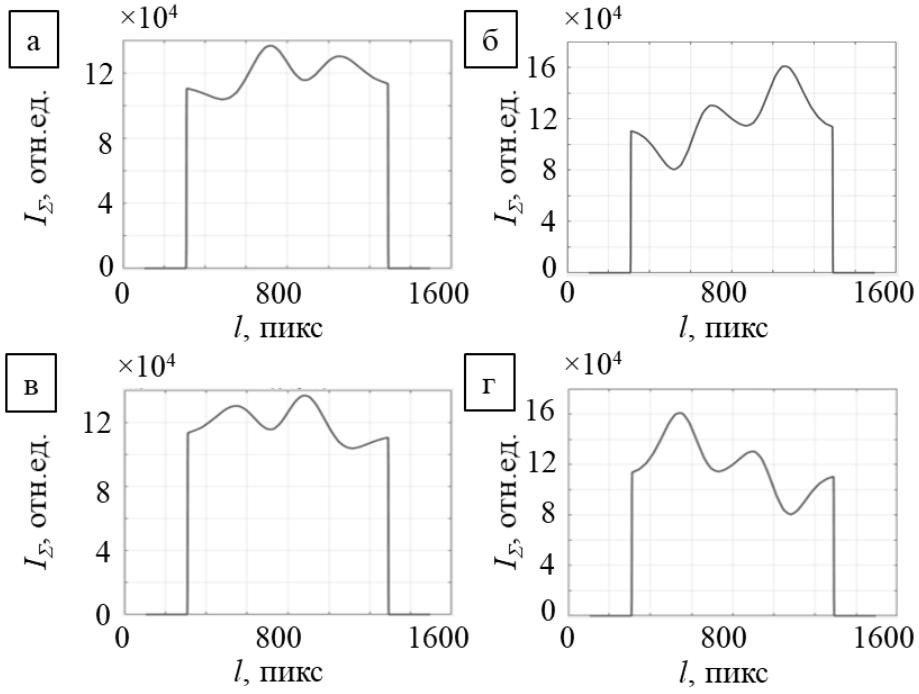

Рисунок 2.10 – Профили тестового изображения, полученные под углами:
а – φ = 0°; б – φ = 90°; в – φ = 180°; г – φ = 270°

Далее из полученных проекций при помощи обратного преобразования Радона восстанавливалось исходное изображение. Результаты реконструкций гауссового распределения обратным преобразованием Радона, полученные при разном количестве проекций и угловом шаге, представлены на рисунке 2.11.

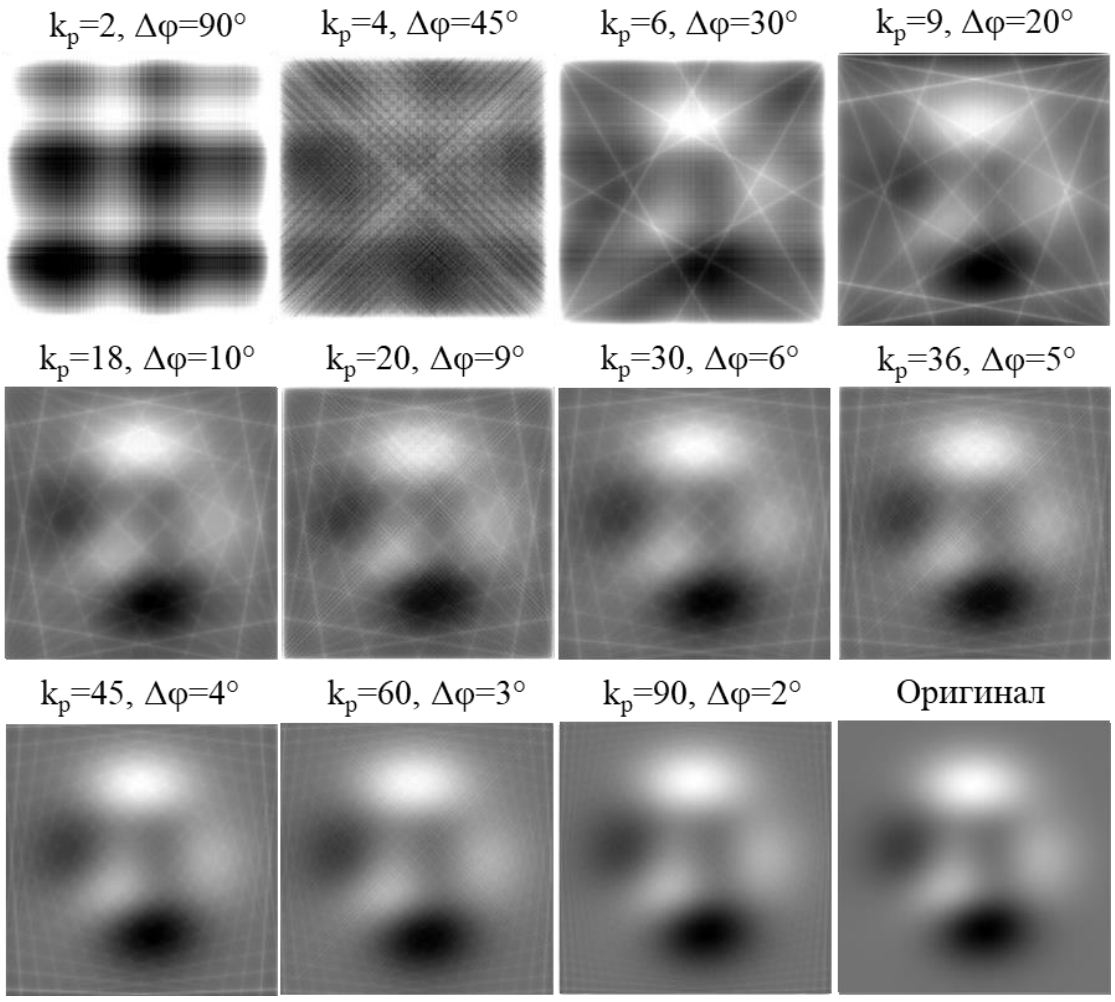

Рисунок 2.11 – Результаты реконструкции гауссового распределения обратным преобразованием Радона при разных количествах проекций k_p, полученных с угловым шагом Δφ

На рисунке 2.12 представлены зависимости среднеквадратичного отклонения интенсивности восстановленного изображения от истинного и евклидовы расстояния между изображениями от количества проекций.

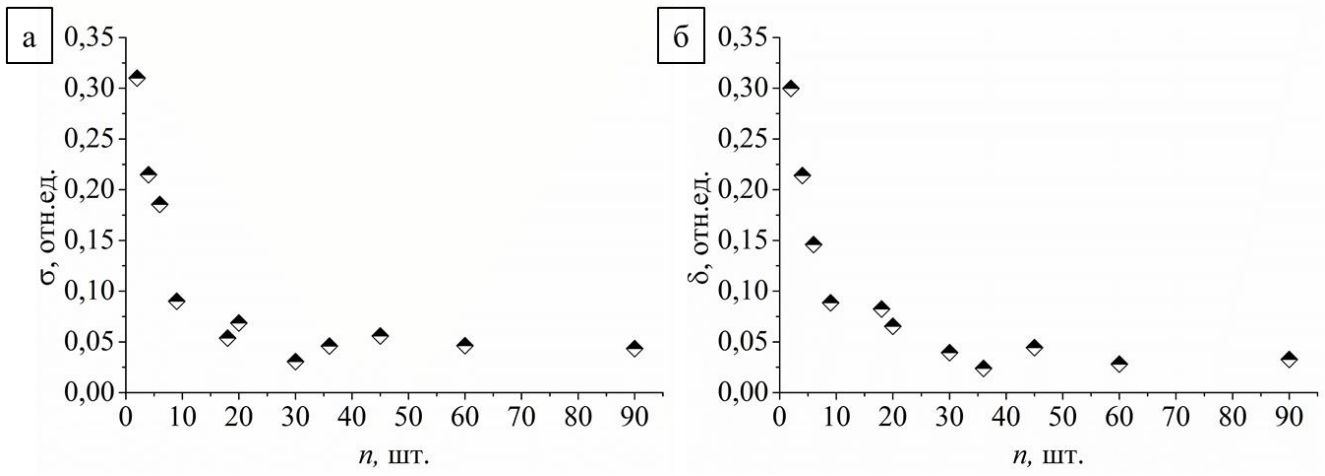

Рисунок 2.12 – Графики зависимости критериев качества реконструированных распределений с несколькими максимумами и минимумами от количества проекций: а – среднеквадратического отклонения, б – евклидова расстояния

Полученные результаты (рисунки 2.11 и 2.12) согласуются между собой, а значения σ и δ в каждой точке отличаются не более чем на 3%. Таким образом, для количественной оценки результатов, полученных методом многоуглового сканирования для регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка может использоваться как среднеквадратическое отклонение (формула (2.3б)), так и евклидово расстояние (формула (2.4)).

Для реализации метода многоуглового сканирования пучка необходимо определить оптимальное количество проекций ($n_{опт}$). В данном случае оптимальным количеством является такое значение, при котором результат реконструкции всё еще достоверный при минимальном количестве времени, затраченном на проведение измерения. Данной определение можно описать математически следующим образом: $n_{опт}$ – это точка, в которой скорость возрастания функции совпадения изображений от n равна скорости возрастания функции времени от n. Таким образом, для определения $n_{опт}$ необходимо найти производную разности функции совпадения изображений ($f(n)$) и функции времени ($t(n)$). Такой подход к поиску оптимального значения предложен в работе [82].

При реализации метода многоуглового сканирования время измерения пропорционально количеству проекций и его можно описать линейной функцией:

$$t(n) = a \cdot n + d. \tag{2.7}$$

Полученные значения σ и δ реконструкций распределения характерного для пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка достоверно аппроксимируются (R^2=0,85 и R^2=0,88 соответственно) степенной функцией, ее можно описать как:

$$\Delta(n) = b \cdot n^c, \tag{2.8}$$

где Δ – обозначен критерий количественной оценки различия двух изображений.

Так как σ и δ описывают различие между изображениями, для поиска оптимального количества проекций была записана функция, описывающая совпадение изображений:

$$f(n) = 1 - \Delta(n) = 1 - b \cdot n^c, \tag{2.9}$$

Для определения $n_{\text{опт}}$ необходимо вычесть (2.9) из (2.7) и найти максимум полученной функции:

$$f(n) - t(n) = 1 - b \cdot n^c - a \cdot n - d,$$

$$(f(n) - t(n))' = -b \cdot c \cdot n^{c-1} - a,$$

$$-b \cdot c \cdot n^{c-1} - a = 0,$$

$$n_{\text{опт}} = \sqrt[c-1]{-\frac{a}{b \cdot c}}. \tag{2.10}$$

На рисунке 2.13 графически представлен поиск $n_{\text{опт}}$, где критерий совпадения изображений и время нормированы на 1.

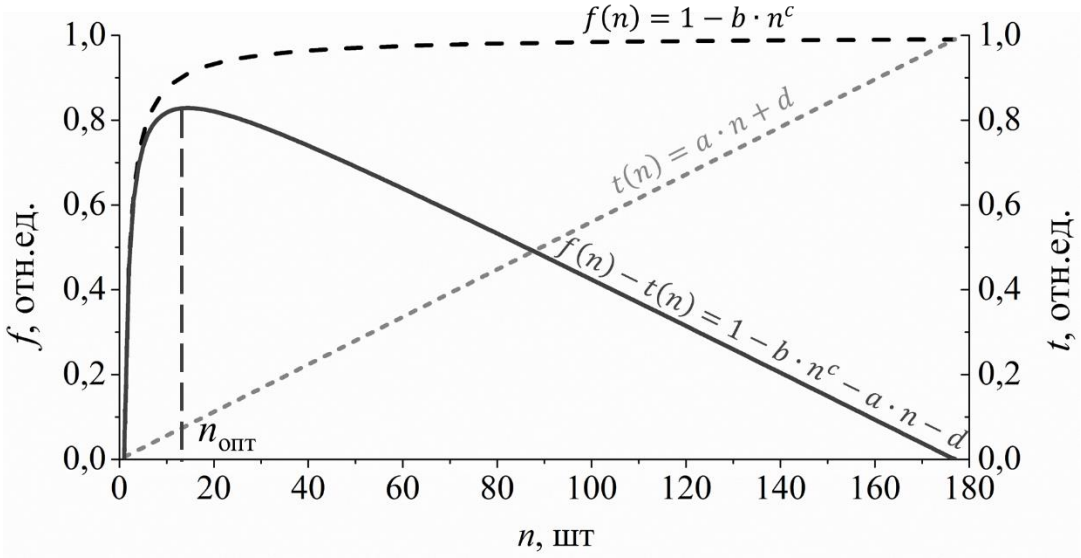

Рисунок 2.13 – К пояснению вывода формулы для поиска $n_{\text{опт}}$ (2.10)

Для нахождения $n_{\text{опт}}$ по формуле (2.10) были получены аппроксимационные степенные уравнения $\sigma(n)$ и $\delta(n)$, а также составлено уравнение $t(n)$. Таким образом, были получены коэффициенты необходимые для определения $n_{\text{опт}}$. Для обоих расчетов $n_{\text{опт}}$ равно 10. Данное значение получено для расчетных распределений и не учитывает погрешностей измерений, обусловленных работой узлов экспериментальных установок. В связи с этим далее в работе по апробации метода многоуглового сканирования количество проекций всегда было больше 10.

Полученное выражение для поиска $n_{\text{опт}}$ (формула (2.10)) в дальнейшем будет применяться для практической реализации метода многоуглового сканирования на конкретной установке.

Результаты, полученные в данной главе, опубликованы в работах [83-88].

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПУЧКА

В данной главе проводится поиск экспериментальной установки для регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка методом многоуглового сканирования. На первом этапе экспериментальная установка была основана на сканировании пучка металлической полоской, на которой теряется часть электронов. Для этого было разработано металлическое устройство сканирования. Результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка на основе металлического детектора показали необходимость доработки установки таким образом, чтобы исключить влияние электромагнитных наводок.

На основе анализа полученных результатов было предложено в качестве сканирующего элемента использовать диэлектрический оптический фибер, в теле которого под действием высокоэнергетичных электронов генерируется вторичное излучение (излучение Вавилова-Черенкова, переходное излучение, тормозное излучение). Результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с применением такого детектора показали, что интенсивность регистрируемых черенковских фотонов изменяется в зависимости от угла влета электрона в тело детектора: чем ближе угол влета к черенковскому углу, тем выше интенсивность генерации фотонов. Таким образом, детектор на основе оптоволокна было предложено заменить на детектор на основе сцинтиллятора. В конце главы показаны результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью экспериментальной установки, основанной на сцинтилляционном детектирующем элементе.

В заключении главы приведено сравнение значений среднеквадратичных отклонений и евклидовых расстояний, полученных в каждом эксперименте, и проведен анализ результатов регистрации энергетического распределений

электронов в поперечном сечении пучка с помощью разных экспериментальных установок.

3.1. Регистрация энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью металлического сканирующего детектора

Идея метода многоуглового сканирования пучка была основана на проволочном сканировании, в связи с этим на первоначальном этапе было принято решение изготовить сканирующее устройство, представляющее собой металлический сканер.

3.1.1 Проведение эксперимента на основе металлического сканирующего детектора

В качестве источника излучения в эксперименте по апробации метода многоуглового сканирования использовался ускоритель Микротрон ТПУ с энергией электронного пучка, равной 6,1 МэВ. Размер поперечного сечения пучка на выходе составлял 4,0×2,0 мм^2; длительность пучка 4 мкс; частота повторения 1-8 Гц; расходимость пучка – 0,1 рад [89].

По результатам, представленным в разделе 2.3, было решено, что оптимальное количество проекций сканирования составляет около 20. На основе этого было разработано сканирующее устройство, которое представляет собой прямоугольную алюминиевую раму толщиной 10 мм, с семью плоскими элементами шириной 1 мм, расположенными относительно друг друга под разными углами с шагом 9° (рисунок 3.1.1). Металлический сканер был изготовлен из алюминиевого листа с помощью координатного фрезерного станка.

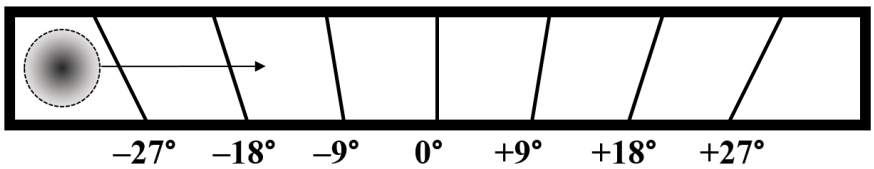

Рисунок 3.1.1 – Схема сканирующего устройства

На рисунке 3.1.1 стрелкой показано условное направление движения пучка относительно сканирующего устройства. В эксперименте положение пучка не

изменялось, а перемещалась металлическая рама. При движении устройства пучок последовательно пересекался пластинами, ориентированными под углами –27°, –18°, –9°, 0°, +9°, +18°, +27° по отношению к вертикали. В следующих сканированиях ориентация и направление движения детектирующего сканера изменялось на ±63°, что позволило получить 21 зависимость тока пучка от положения сканирующего элемента, ориентированной под углами от –90° до +90° с шагом 9°. Для наглядности на рисунке 3.1.2 представлена схема перемещения сканирующего детектора.

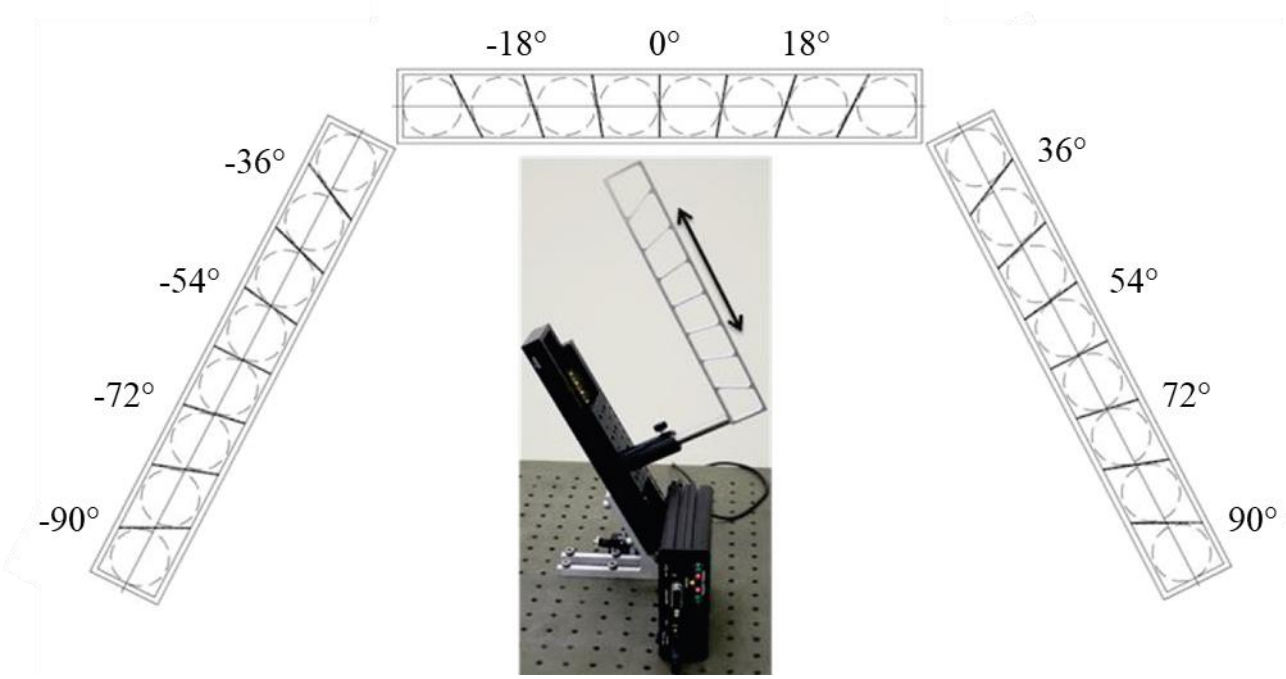

Рисунок 3.1.2 – Схема перемещения сканирующего детектора

Здесь и в последующих экспериментах детектирующие элементы перемещаются с помощью контроллеров, моторизированных линейных трансляторов и моторизированных поворотных платформ фирмы Standa [90]. Такие устройства обеспечивают достаточно точное позиционирование детектора, возможность выбора скорости его перемещения, возможность дистанционного управления, для чего производитель предоставляет как собственное программное обеспечение, так и наборы программных инструментов SDK на различных языках программирования для создания собственных приложений с необходимым функционалом. В данном эксперименте использовался моторизированный

линейный транслятор 8MT175 [91], характеристики которого представлены в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1 – Характеристики моторизированного линейного транслятора 8MT175

Характеристика	Значение, единица измерения
Шаг ведущего винта	0,5 мм
Разрешение на полном шаге	2,5 мкм
Разрешение на 1/8 шага	0,31 мкм
Максимальная скорость	10 мм/сек
Максимальная нагрузка	8 кг

Ток пучка измерялся с помощью цилиндра Фарадея, расположенного на расстоянии 100 см от выходного окна ускорителя. Кроме этого, в устройстве вывода пучка был установлен контрольный индукционный датчик. Данные, полученные с цилиндра Фарадея, нормировались на сигнал индукционного датчика, что позволяло учесть возможные изменения полного тока ускоренных частиц, обусловленные особенностями работы ускорителя. В эксперименте сканирующее устройство располагалось между источником излучения и цилиндром Фарадея. Часть электронов поглощалась и рассеивалась на плоских элементах сканирующего детектора, таким образом, сигнал на цилиндре Фарадея менялся в зависимости от положения сканера. Экспериментальная геометрия показана на рисунке 3.1.3, расстояния представлены в сантиметрах.

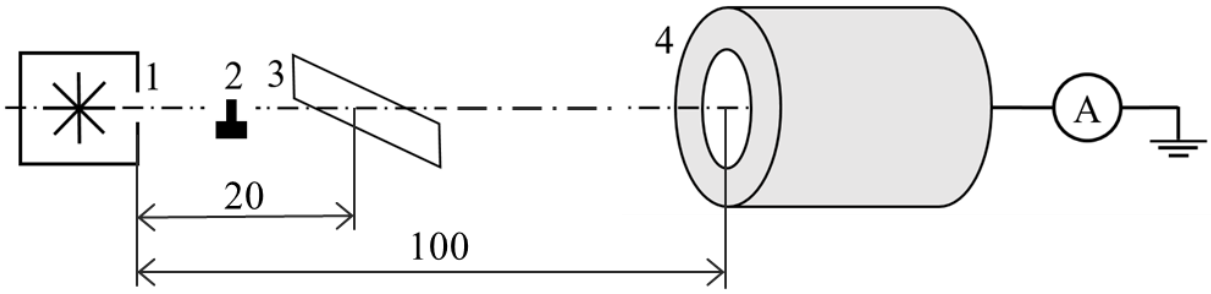

Рисунок 3.1.3 – Геометрия эксперимента:

1 – источник; 2 – металлическая мишень;

3 –сканирующее устройство; 4 – цилиндр Фарадея

Для оценки корректности результатов измерения пространственных характеристик пучка предложенным методом проводилось измерение открытого пучка и пучка с металлической мишенью сложной формы, которая располагалась максимально близко к выходному окну ускорителя (рисунок 3.1.3).

Здесь и в следующих разделах диссертационной работы для оценки результатов проводятся дополнительные измерения энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка дозиметрическими пленками Gafchromic EBT2 [92] или Gafchromic EBT3 [93], которые устанавливаются на том же расстоянии, что и сканирующее устройство. Дозиметрические пленки предназначены для регистрации пространственных и дозовых характеристик гамма- и рентгеновских пучков, пучков электронов, протонов, ионов, α-частиц и нейтронов. Пленочные дозиметры нечувствительны к дневному свету, что позволяет с их помощью проводить измерения в условиях обычного освещения. Принцип работы таких устройств описан в разделе 1.5. Ограничением при применении пленочных дозиметров для измерения характеристик промышленных пучков является их относительно небольшой диапазон измерения поглощенной дозы, который составляет от 0,1 Гр до 20 Гр [92, 93]. Здесь и далее в диссертационной работе для оцифровки пленочных дозиметров использовался планшетный сканер Epson Perfection V750 Pro [93], с помощью которого были получены цифровые изображения в формате TIFF, которые в свою очередь обрабатывались с использованием специального программного кода [93], разработанного с помощью пакета прикладных программ MATLAB [81]. Для корректного сравнения результатов при оцифровке пленочных дозиметров разрешение сканирования выбиралось в соответствии с шагом детектирующего элемента.

Здесь и далее в диссертационной работе для обработки результатов будут использованы программные пакеты Diada [96] и INKCT [97], разработанные Чахловым С.В. в Российско-китайской научной лаборатории радиационного контроля и досмотра Томского политехнического университета. В программном пакете Diada исходные экспериментальные данные, представленные в матричном

виде, где столбцы соответствуют линейному положению сканирующего элемента, а строчки – углу сканирования, импортируются в графический вид таким образом, чтобы каждой ячейке матрицы соответствовал один пиксель изображения с уровнем яркости в градациях серого цвета, соответствующим значению, записанному в ячейке. Таким образом, в ходе обработки получается изображение, которое в томографии называют синограмма, размеры которого по горизонтали составляют количество пикселей, соответствующее количеству шагов детектора, а по вертикали – количеству проекций измерения. Синограмма сохраняется в формате tif. Также в данной программе может быть проведена обработка полученных данных.

В программном пакете INKCT проводится реконструкция энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка из полученных синограмм. Для восстановления данных в программе задаются такие параметры эксперимента, как угловой шаг, количество шагов детектора, центр вращения. Также программа позволяет проводить фильтрацию данных и логарифмическую коррекцию при реконструкции в случае необходимости. Для достоверной реконструкции по формуле Радона (описанной в разделе 2.2 настоящей работы) при обработке экспериментально полученных данных в разделах 3 и 4 диссертационной работы всегда использовалась фильтрация.

3.1.2 Результаты эксперимента, проведенного с использованием сканирующего металлического детектора

В ходе эксперимента были получены зависимости тока электронного пучка, детектируемого цилиндром Фарадея от позиции сканирующего устройства. На рисунке 3.1.4 представлен внешний вид полученных данных, нормированных на единицу.

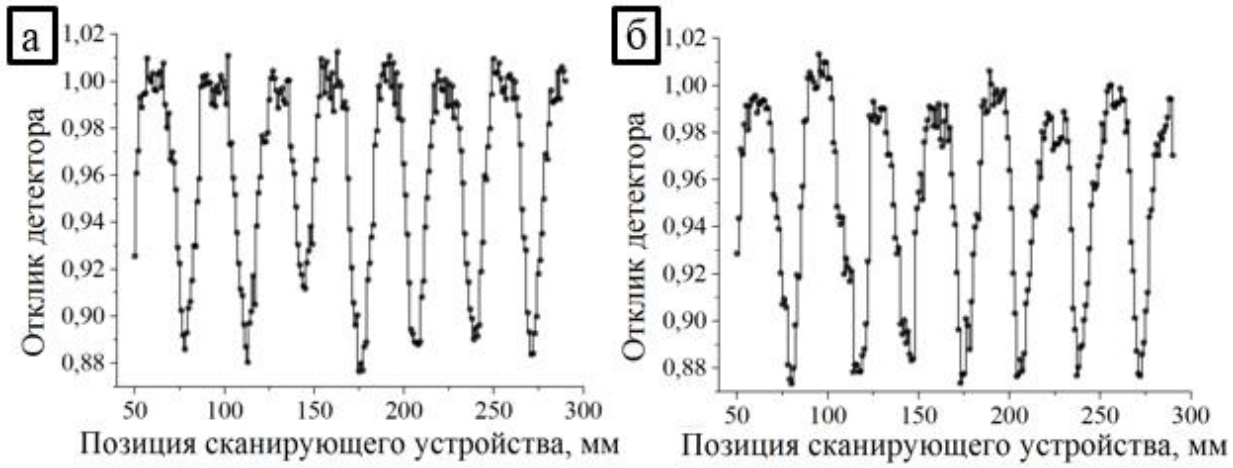

Рисунок 3.1.4 – Экспериментальные данные: а – без мишени; б – с мишенью

На следующем этапе экспериментальные данные (рисунок 3.1.4) были разделены на отдельные пики. Для каждого пика был определен центр с учетом его положения и относительного смещения плоскостей сканирования устройства. Полученные результаты представляли собой матрицу из 21 строчки, каждая из которых содержала в себе 31 значение тока электронного пучка, детектируемого цилиндром Фарадея. Для подготовки синограммы, являющейся графическим представлением результатов сканирования, принятым в томографических исследованиях, значения от 0 до 1 были переведены в градации серого, после чего каждая из 21 группы данных была преобразована в графическое изображение размером 1×31 пиксель (строчку длинной 31 пиксель).

Ширина шага в каждом пике пересчитывалась, так как смещение пластин относительно центра пучка меняется при разных углах их наклона. Для этого ширина строчек изменялась с 31 на большее значение и умножалась на синус угла наклона пластины, соответствующей данному пику. Полученные строчки, имеющие разную ширину, центрировались и складывались в соответствующем порядке в двухмерные изображения. Неровные края синограмм обрезались для получения прямоугольного изображения. На рисунке 3.1.5 представлены полученные синограммы для пучка без мишени и с мишенью.

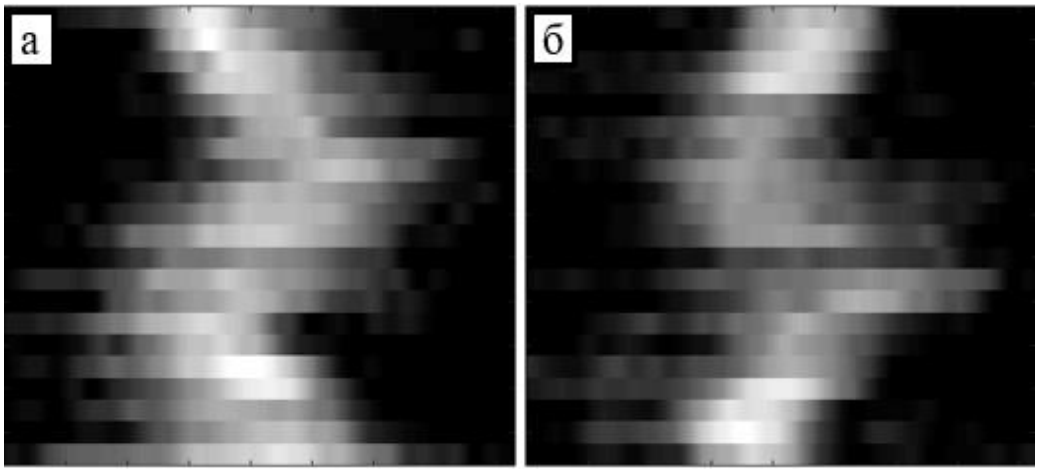

Рисунок 3.1.5 – Результаты сканирования электронного пучка металлическим сканером, представленные в виде синограмм: а – без мишени; б – с мишенью

После этого при помощи методов томографической реконструкции из синограмм восстанавливались энергетические распределения электронов в поперечном сечении пучка.

Для оценки полученных результатов, распределение интенсивности электронов в поперечном сечении пучка коллимированного пучка было также зарегистрировано с помощью дозиметрических пленок, которое представлено на рисунке 3.1.6.

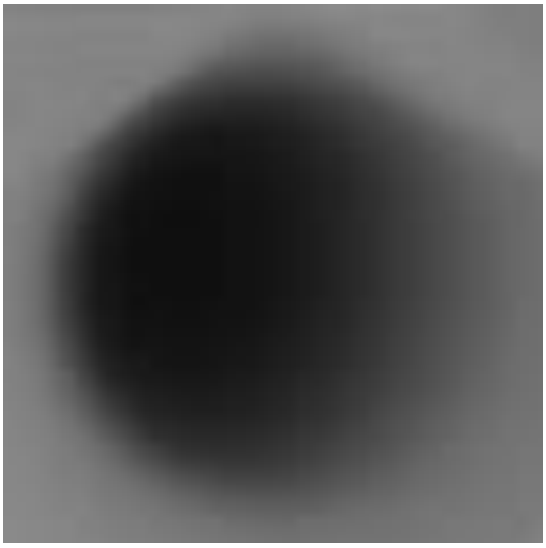

Рисунок 3.1.6 – Оцифрованные результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении коллимированного пучка с помощью дозиметрической пленки

При регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка пленочный дозиметр был установлен на металлическом сканере, таким образом, что его часть перекрывалась металлом, что обуславливает светлые полосы в верхней части рисунка 3.1.6. Для корректной оценки результатов оцифрованные пленочные дозиметры были обработаны, таким образом, чтобы разрешение составляло 1 мм, что соответствует шагу смещения детектирующего элемента и его толщине.

На рисунке 3.1.6 представлены энергетические распределения электронов в поперечном сечении коллимированного пучка, полученные дозиметрическими пленками (а) и сканирующим устройством после реконструкции (б). Пунктирными линиями на рисунках обозначена форма пучка.

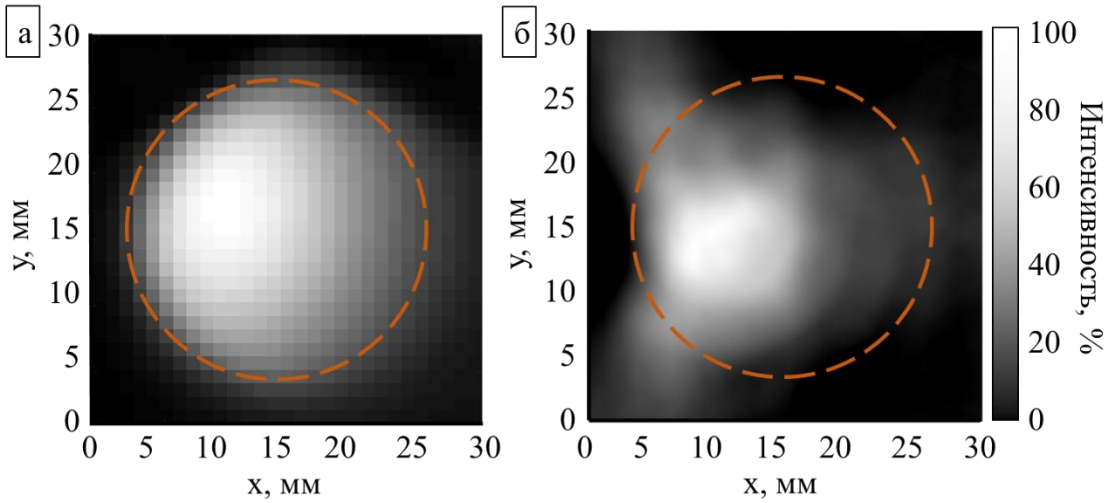

Рисунок 3.1.7 – Результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении коллимированного пучка с помощью:

а – дозиметрических пленок; б – металлическим сканером

На основе рисунков 3.1.7а и 3.1.7б по формулам (2.3б) и (2.4) были определены среднеквадратичное отклонение и евклидово расстояние результатов, полученных предлагаемым методом, от данных с пленочных дозиметров, которые равны 0,365 и 0,386 соответственно. Для проведения сравнения результатов, изображения были представлены в виде матриц значений интенсивностей, которые были нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в обоих матрицах были равны.

Для анализа полученных результатов на рисунке 3.1.8 представлены поперечные профили пучка.

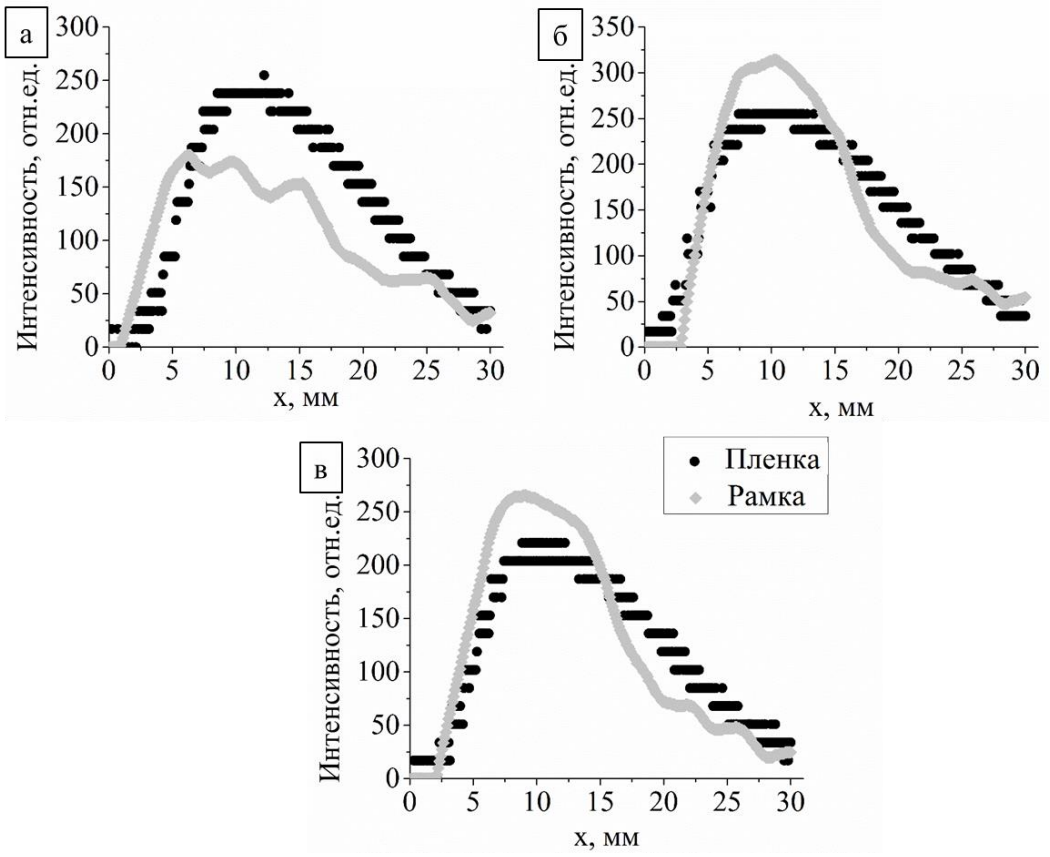

Рисунок 3.1.8 – Поперечные профили коллимированного электронного пучка, измеренные пленочными дозиметрами и металлическим сканером:

а – y = 10 мм; б – y = 15мм; в – y = 20 мм

Здесь y – это смещение положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунок 3.1.7). На рисунке 3.1.7 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки (результаты измерения, представленные в виде матриц, нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в обоих матрицах были равны).

Для оценки работоспособности метода были проведены дополнительные измерения пучка с мишенью. На рисунке 3.1.9 представлены результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с мишенью с помощью пленок и предложенным методом. Пунктирными линиями на рисунках обозначена форма пучка.

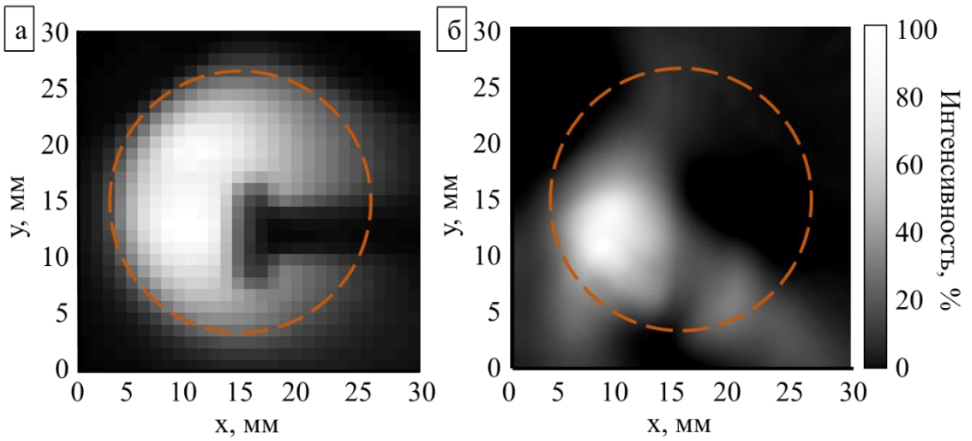

Рисунок 3.1.9 – Результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с мишенью с помощью:
а – дозиметрических пленок; б – металлического сканера

Среднеквадратичное отклонение и евклидово расстояние в данном эксперименте составили 0,461 и 0,474 соответственно.

На рисунке 3.1.10 представлены поперечные профили пучка с мишенью.

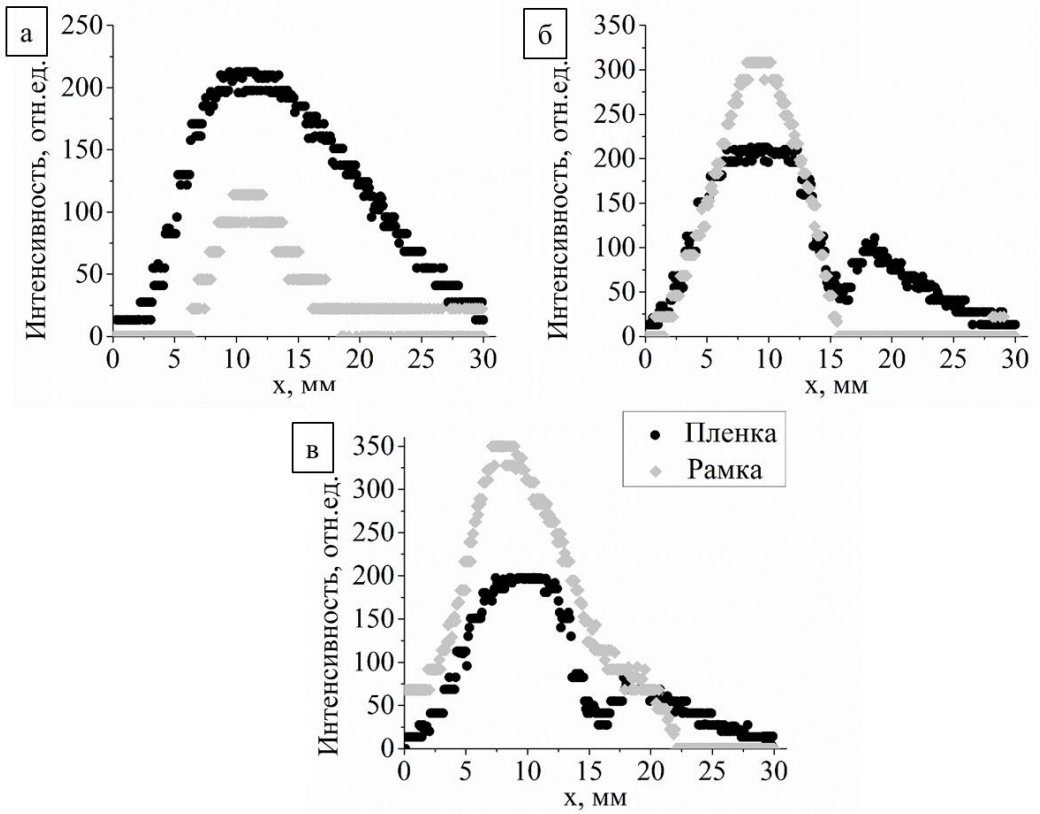

Рисунок 3.1.10 – Поперечные профили пучка с мишенью, измеренные пленочными дозиметрами и металлическим сканером:
а – y = 10 мм; б – y = 15мм; в – y = 20 мм

Здесь y – это смещение положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунок 3.1.9). На рисунке 3.1.10 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки (результаты измерения, представленные в виде матриц, нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в обоих матрицах были равны).

3.1.3 Анализ результатов экспериментов, проведенных с использованием сканирующего металлического детектора

Полученные результаты в эксперименте без мишени (рисунки 3.1.7 и 3.1.8) показывают, что метод многоуглового сканирования позволяет с точностью до 2 мм определить положение электронного пучка, однако, значения интенсивности излучения в точке, измеренные предложенным методом, могут отличаться на 25%, что обуславливает величину полученных среднеквадратичного отклонения и евклидова расстояния (σ=0,365 и δ=0,386). Результаты эксперимента с мишенью показали, что с увеличением «сложности» пучка, уменьшается качество реконструкции (σ=0,461 и δ=0,474). Значения интенсивности излучения в эксперименте с мишенью может отличаться от истинного на 50%, положение «горячего пятна» пучка определяется с разрешением до 2 мм (рисунки 3.1.10б и 3.1.10в), однако в области небольшого падения интенсивности излучения (на рисунке 3.1.9 область от y = 20 до y = 30) пучок не просматривается (рисунок 3.1.10а). Видно, что результаты реконструкции позволяют оценить форму пучка и профили (рисунки 3.1.8 – 3.1.10), однако качество полученных реконструкций недостаточно высокое.

Причинами, обуславливающими качество полученных результатов, могут быть нестабильность тока измеряемого пучка, большое количество электромагнитных наводок на измерительное оборудование. Использование цилиндра Фарадея приводит к полной потере пучка, что не всегда применимо. Поэтому возникла идея измерять уровень тока электронов, поглощенных не в детекторе, а в сканирующем элементе. Сигналы с цилиндра и сканера должны

иметь обратную корреляцию. На рисунке 3.1.11 представлены данные, полученные одновременно с помощью цилиндра Фарадея и непосредственно со сканирующего устройства.

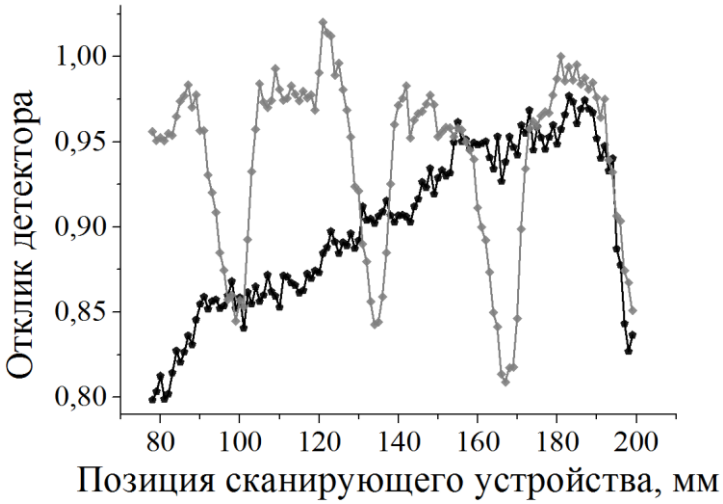

Рисунок 3.1.11 – Сравнение нормированных значений токов, полученных: —•— – с помощью цилиндра Фарадея, —•— – непосредственно со сканирующего устройства

Полное отсутствие корреляции данных демонстрирует то, что сигнал, полученный непосредственно со сканирующего устройства, обусловлен, в первую очередь, высокочастотными электромагнитными наводками от магнетрона системы питания и других узлов установки.

Одним из путей решения проблем с наводками может быть использование в качестве сканирующего элемента оптоволоконного фибера. Возможности такого подхода описаны в работах [98-102]. Подход основан на генерации излучения Вавилова-Черенкова электронами в оптоволоконных фиберах и его дальнейшей регистрации фотоэлектронным умножителем. В этом случае, анализ интенсивности излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого в фибере при различных его положениях, может быть использован в качестве альтернативы анализу тока пучка электронов, зарегистрированного цилиндром Фарадея, или тока электронов, поглощенных в сканирующем элементе.

3.2. Регистрация энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого в диэлектрическом материале

Для оценки возможности использования оптоволокна для регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка было предложено провести измерение в упрощенной геометрии, которая заключалась в поперечном построчном сканировании пучка электронов диэлектрическим фибером, расположенным параллельно пучку. Здесь и далее под фибером подразумевается кабель, изготовленный на базе оптического волокна. При взаимодействии электронов с высокой энергией с диэлектрической средой, являющейся материалом фибера, возникает излучение Вавилова-Черенкова. Измерение интенсивности этого излучения может позволить определить количество электронов, попавших в рабочую область детектора [99, 100]. Таким образом, перемещая детектирующий элемент в заданной плоскости, можно получить энергетическое распределение электронов в поперечном сечении пучка.

3.2.1 Проведение эксперимента по построчному торцевому сканированию электронного пучка с помощью диэлектрического фибера

Исследование возможности измерения интенсивности электронов в поперечном сечении пучка с помощью излучения Вавилова-Черенкова производилось с помощью ускорителя – микротрон МИ-6 Томского политехнического университета [100]. В эксперименте кинетическая энергия электронов в выведенном пучке составляла 5,7 МэВ, длительность пучка – 0,5 мкс, диаметр пучка на выходе – 10 мм, ток – 240 мкА/имп, количество электронов в импульсе – 10^9, частота импульсов – 50 Гц. Схема микротрона МИ-6 ТПУ представлена на рисунке 3.2.1.

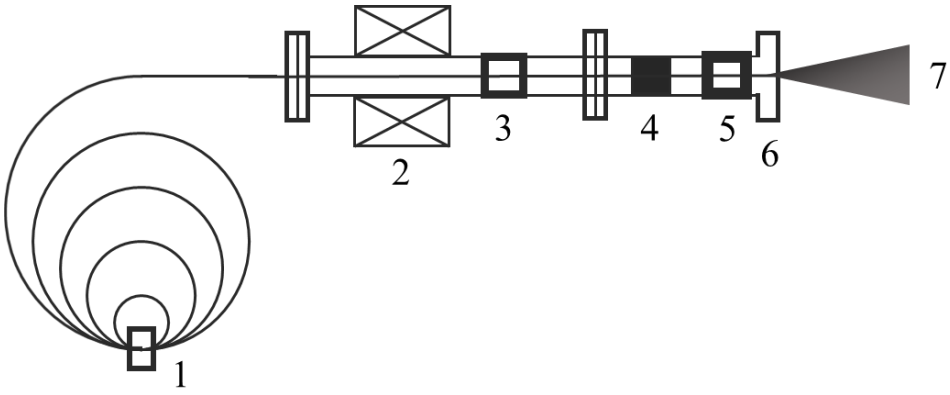

Рисунок 3.2.1 – Схема ускорения и вывода электронного пучка на микротроне МИ-6 ТПУ:

1 – инжектор ускорителя; 2 – фокусирующий магнит; 3 – первый коллиматор; 4 – индукционный датчик; 5 – второй коллиматор; 6 – выходное окно; 7 – электронный пучок

Электронный пучок, ускоренный в микротроне, проходил через фокусирующий магнит, первый коллиматор, индукционный датчик, второй коллиматор диаметром 1 мм, после этого, через алюминиевое выходное окно, толщина которого около 100 мкм, выходит в атмосферу. В работе [100] оценивалась угловая расходимость пучка после выходного окна и слоя воздуха толщиной 50 мм, которая равна около 5°.

В качестве детектирующего элемента в эксперименте использовался оптоволоконный кабель [103], который относиться к оптоволокну типа G.652.D [104]. Диаметр сечения рабочей области детектора (оптоволоконный материал) составлял 0,09 мм, общая длина кабеля – 1,4 м, диаметр оболочки – 125 мкм, коэффициент затухания – не более 0,4 дБ/км. На рисунке 3.2.2 представлен внешний вид оптоволоконного кабеля, использовавшегося в эксперименте [103].

Рисунок 3.2.2 – Внешний вид использовавшегося в эксперименте оптоволоконного кабеля

Под действием высокоэнергетических электронов в оптоволокне генерировалось вторичное излучение. Оптоволокно экранировалось свинцом для исключения попадания электронов в тело детектирующего элемента вне рабочей области. Свет по оптическому каналу поступал на фотодетектор. Экспериментальные данные набирались при построчном торцевом сканировании пучка оптоволокном.

В диссертационной работе для усиления и детектирования светового излучения использовался фотодетектор, представляющий собой матрицу, состоящую из множества параллельно соединенных пикселей лавинных фотодиодов, работающих в гейгеровском режиме. Такой фотодетектор называют кремниевый фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) [105].

В экспериментах использовался кремниевый ФЭУ MicroSB/FB фирмы SensL [106], который имел активную область 6×6 мм^2, спектральный диапазон от 300 нм до 800 нм, эффективность регистрации фотонов до 47% на длине волны 420 нм, коэффициент усиления 10^6 и низкое напряжение смещения – 24,5 В. Дополнительными преимуществами использования кремниевого ФЭУ для измерения интенсивности излучения в поперечном сечении электронного пучка являются компактные размеры, минимальная чувствительность к воздействию магнитных полей, работа от низкого напряжения, механическая прочность, устойчивость к засветке, слабая реакция на ионизирующее излучение и возможность работы в вакууме.

На рисунке 3.2.3 приведена схема установки по испытанию возможности регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении электронного пучка с помощью излучения Вавилова-Черенкова.

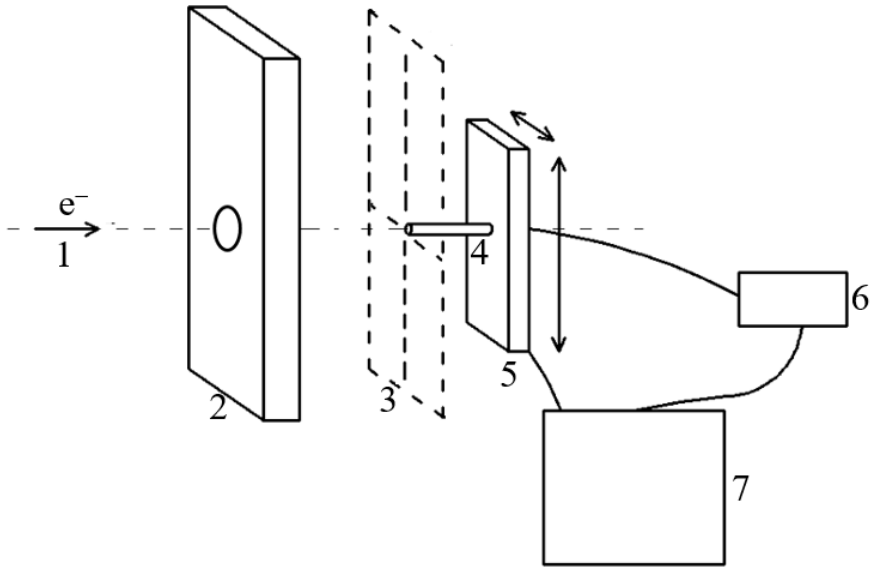

Рисунок 3.2.3 – Схема установки: 1 – ускоренный пучок электронов; 2 – коллиматор; 3 – плоскость сканирования; 4 – оптоволокно; 5 – система позиционирования оптоволокна; 6 – система детектирования и оцифровки сигнала; 7 – персональный компьютер.

Выведенный пучок ускоренных электронов с энергией 5,7 МэВ проходит через систему коллимации. На пути следования электронов параллельно ему в заданной плоскости располагается диэлектрический фибер в свинцовой защите. При помощи системы позиционирования фибер перемещается в плоскости. Возникающее в результате взаимодействия с высокоэнергетическими электронами черенковское излучение в оптоволокне передается на ФЭУ. Сигнал с кремниевого ФЭУ передавался на спектрометрическое устройство СУ-05 [107] фирмы НЦП «Аспект», которое оснащено импульсным спектрометрическим усилителем УИС-04 [108] и амплитудно-цифровым преобразователем БПА-04 [109]. Основные характеристики импульсного спектрометрического усилителя УИС-04 и амплитудно-цифрового преобразователя БПА-04 представлены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1 – Технические характеристики импульсного спектрометрического усилителя УИС-04 и амплитудно-цифрового преобразователя БПА-04

Импульсный спектрометрический усилитель УИС-04	
Характеристики	Значение
Полярность входных импульсов	положительная/отрицательная
Время нарастания входных импульсов	не более 200 нс
Входное сопротивление усилителя	1 кОм
Полярность выходных импульсов	положительная
Выходное сопротивление	50 Ом
Коэффициент усиления	регулируется ступенями с 1 до 16 по 1,277
Амплитудно-цифровой преобразователь БПА-04	
Характеристики	Значение
Метод преобразования	Вилкинсона
Тактовая частота преобразования	100 МГц
Полярность входного сигнала	положительная
Амплитуда входного сигнала	50 мВ – 10 В
Фронт входного сигнала	не более 0,25 мкс
Спад входного сигнала	не менее 100 мкс
Входное сопротивление	2 кОм

Обработанный сигнал со спектрометрического устройства СУ-05 передается на персональный компьютер. На рисунке 3.2.4 представлен внешний вид экспериментальной установки.

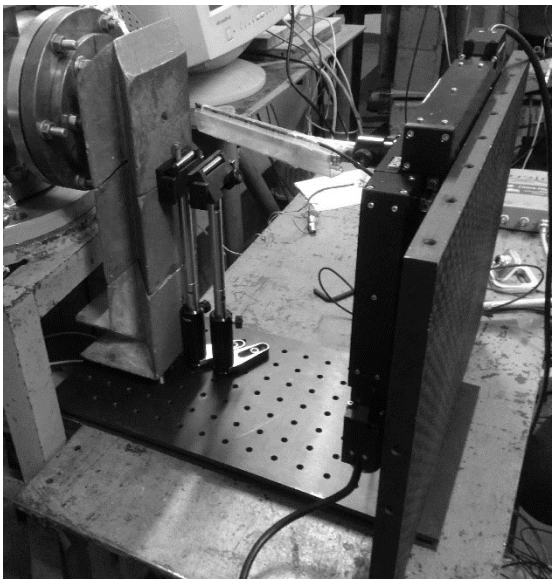

Рисунок 3.2.4 – Вид экспериментальной установки для поперечного построчного сканирования электронного пучка с помощью диэлектрического фибера

Для управления и записи зарегистрированного излучения здесь и далее используется специально разработанное для этого исследования программное обеспечение [110]. Выходные данные представляют собой таблицу с данными о положении фибера и интенсивности сигнала, зарегистрированного на ФЭУ, синхронизованными по времени. В данном эксперименте для перемещения фибера использовался моторизованный двухосный линейный транслятор 8MTF [111], характеристики которого представлены в таблице 3.2.2.

Таблица 3.2.2 – Характеристики моторизованного двухосного линейного транслятора 8MTF

Характеристика	Значение, единица измерения
Шаг ведущего винта	0,5 мм
Разрешение на полном шаге	2,5 мкм
Разрешение на 1/8 шага	0,31 мкм
Максимальная скорость	10 мм/сек
Максимальная нагрузка	50 кг

Для оценки результатов регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью излучения Вавилова-Черенкова, пространственные характеристики пучка были измерены с помощью

пленочных дозиметров Gafchromic EBT3 [93], принцип работы которых приводится в разделах 1.5 и 3.1.1.

3.2.2 Результаты эксперимента построчного торцевого сканирования электронного пучка, полученные с помощью оптоволоконного кабеля

В эксперименте было проведено сканирование пучка с шагом 1 мм. Интенсивность излучения Вавилова-Черенкова, передаваемая по оптическому фиберу, измеряется фотоэлектронным умножителем в «спектральном режиме», для обеспечения лучшей фильтрации шумов. Интенсивность сигнала в каждой точке рассчитывается как среднее по пяти измерениям. Сигнал, полученный при построчном торцевом сканировании пучка электронов фибером, представлен на рисунке 3.2.5.

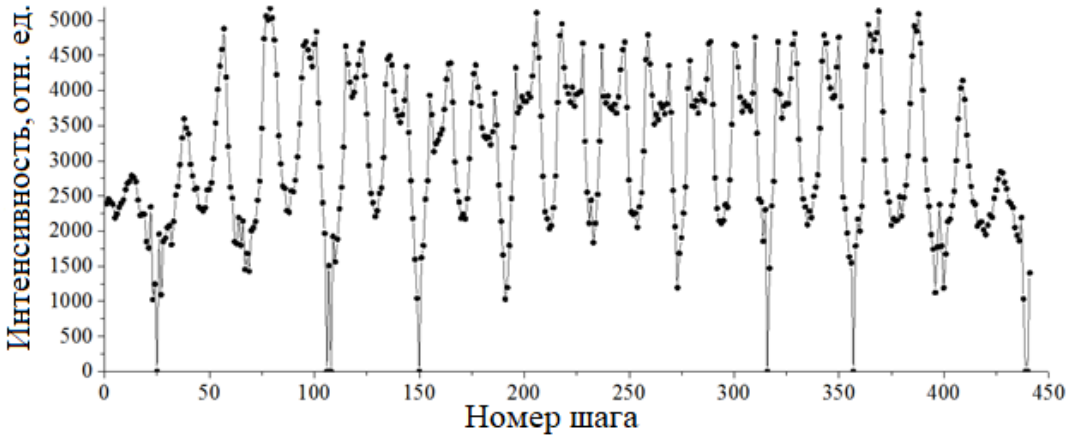

Рисунок 3.2.5 – Зарегистрированный необработанный сигнал при построчном торцевом сканировании электронного пучка диэлектрическим фибером

Каждый пик на рисунке 3.2.5 соответствует одному сканированию поперечного сечения пучка при помощи оптического фибера, и соответствует одной линии поперечного сечения. После каждого прохода сканера, фибер перемещается на один шаг вниз, чтобы выполнить следующее сканирование и сформировать другую линию до тех пор, пока не будет просканировано полное поперечное сечение пучка. Как видно из рисунка, нулевой уровень интенсивности соответствует 2000 относительным единицам. Этот уровень обусловлен фоновым излучением от рабочего ускорителя и электрическими помехами. Более низкие и

нулевые значения вызваны дискриминацией сигнала фотоэлектронным умножителем. Таким образом, 2000 относительных единиц были приняты за фоновый уровень при дальнейшей обработке данных.

После определения значения уровня фона, данные преобразовывались в матрицу с учетом направления сканирования оптического фибера для каждой линии. Таким образом, каждый соседний столбец или строка несли информацию об интенсивности сигнала с шагом 1 мм. Для проверки точности предложенного способа, были проведены измерения энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с использованием дозиметрических пленок. В результате обработки полученных данных, были получены энергетические распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью дозиметрических пленок и оптоволоконного кабеля, представленные на рисунке 3.2.6.

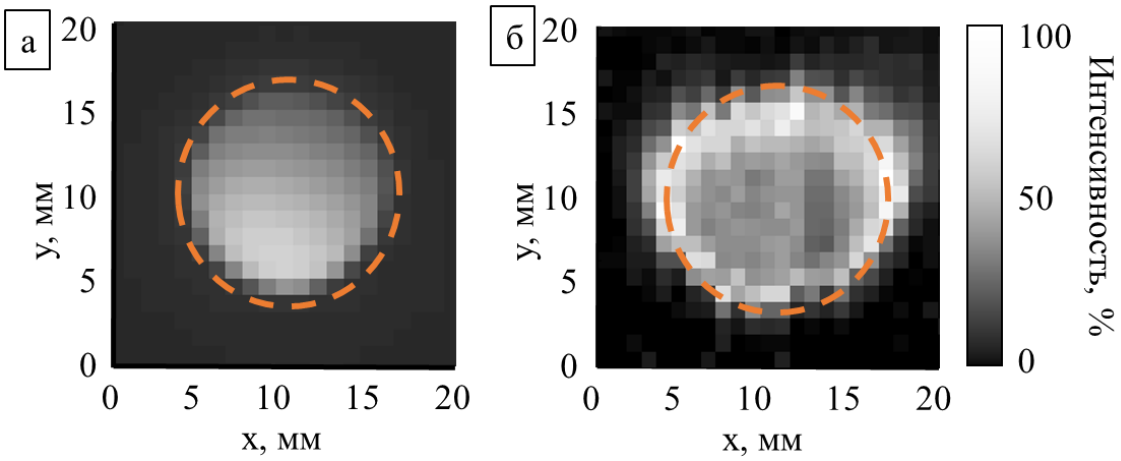

Рисунок 3.2.6 – Энергетические распределения электронов в поперечном сечении коллимированного пучка, полученные с помощью:

а – дозиметрических пленок; б – построчного торцевого сканирования пучка оптоволоконным кабелем

На основе рисунков 3.2.6а и 3.2.6б по формулам (2.3б) и (2.4) были определены среднеквадратичное отклонение и евклидово расстояние результатов, которые равны 0,432 и 0,446 соответственно.

Для анализа полученных результатов на рисунке 3.2.7 представлены поперечные профили пучка.

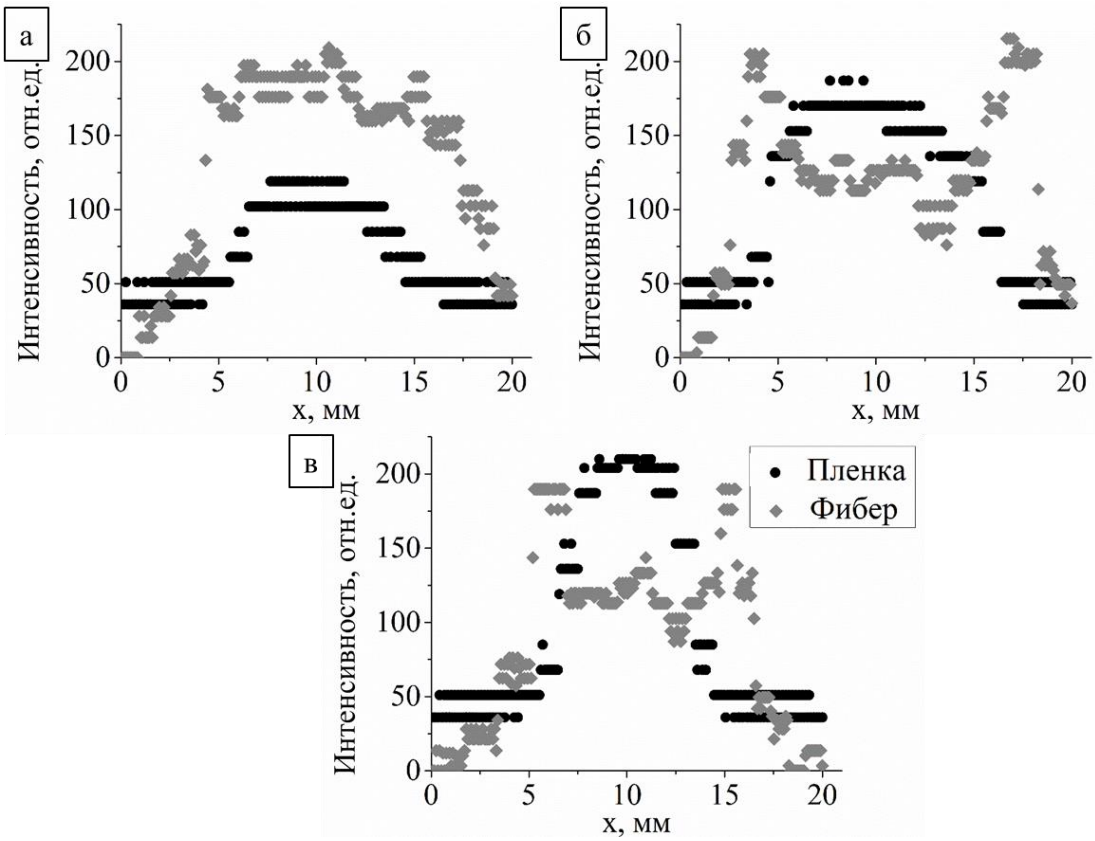

Рисунок 3.2.7 – Поперечные профили коллимированного пучка, измеренные пленочными дозиметрами и оптоволоконным кабелем:

а – y = 6 мм; б – y = 10 мм; в – y = 14 мм

Здесь y – это смещение положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунок 3.2.6). На рисунке 3.2.7 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки (результаты измерения, представленные в виде матриц, нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в обоих матрицах были равны).

Также был проведен эксперимент на пучке сложной формы. Для этого на пути распространения пучка была установлена мишень, в которой первичное излучение частично поглощалось. В результате обработки данных, были получены энергетические распределения электронов в поперечном сечении пучка с мишенью с помощью дозиметрических пленок и оптоволоконного кабеля, представленные на рисунке 3.2.8.

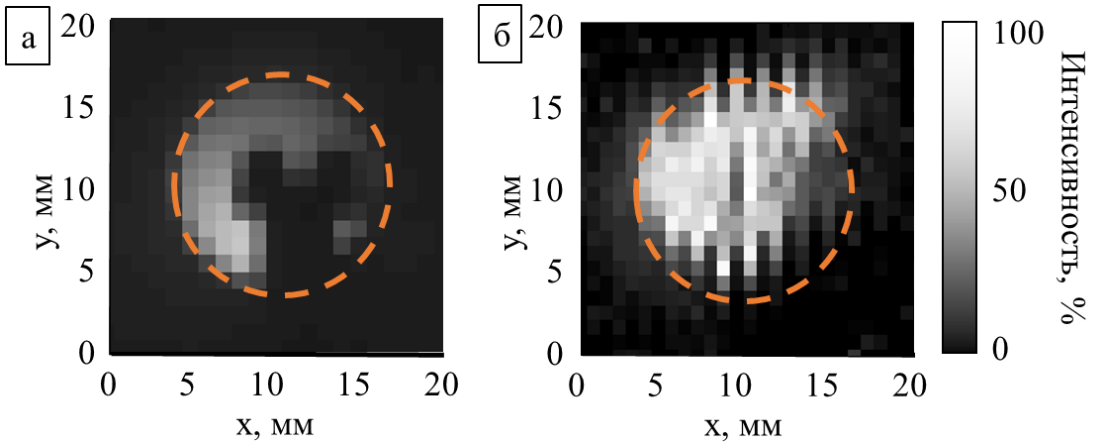

Рисунок 3.2.8 – Энергетические распределения электронов в поперечном сечении пучка с мишенью, полученные с помощью:

а – дозиметрических пленок; б– оптоволоконного кабеля

На основе рисунков 3.2.8а и 3.2.8б по формулам (2.3б) и (2.4) были определены среднеквадратичное отклонение и евклидово расстояние полученных результатов, которые равны 0,429 и 0,411 соответственно.

Для анализа полученных результатов на рисунке 3.2.9 представлены поперечные профили пучка с мишенью.

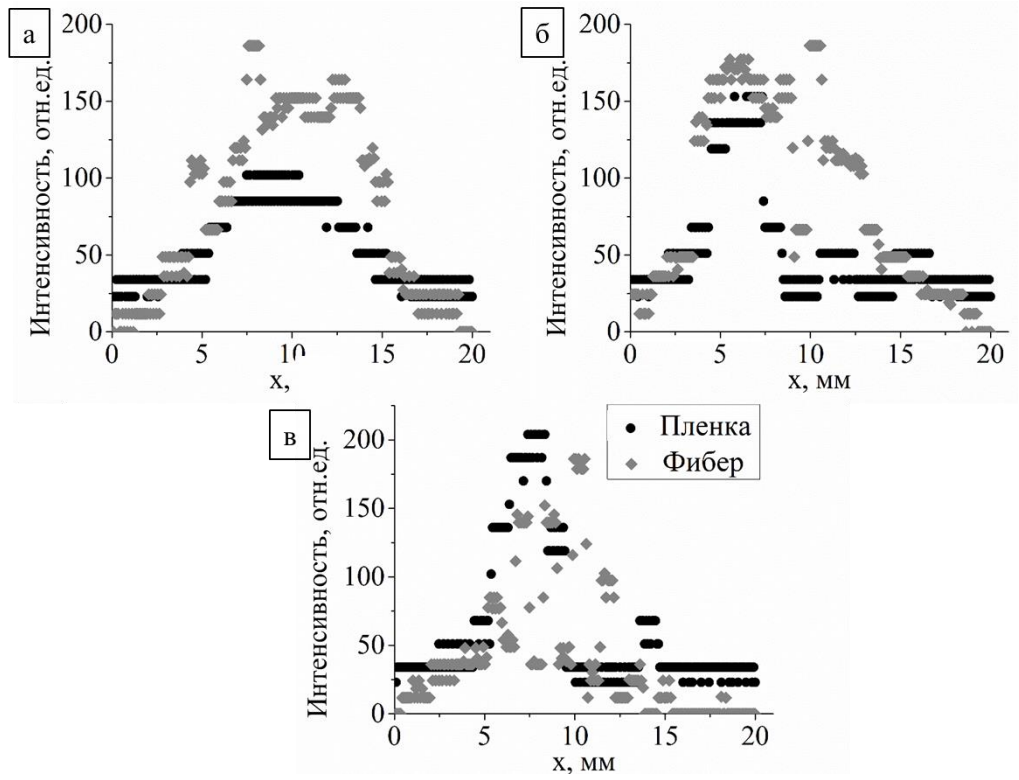

Рисунок 3.2.9 – Поперечные профили пучка с мишенью, измеренные пленочными дозиметрами и оптоволоконным кабелем: а – y = 6 мм; б – y = 10 мм; в – y = 14 мм

Здесь y – это смещение положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунок 3.2.8). На рисунке 2.1.9 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки (результаты измерения, представленные в виде матриц, нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в обоих матрицах были равны).

3.2.3 Анализ результатов экспериментов построчного торцевого сканирования электронного пучка, проведенных с использованием оптоволоконного кабеля

Результаты эксперимента на открытом пучке (рисунок 3.2.6) показывают возможность определения размеров пучка с помощью фибера с точностью 3 мм, однако, значения интенсивности излучения в точке практически не совпадают, что обуславливает величины полученных среднеквадратичного отклонения и евклидова расстояния (σ=0,432 и δ=0,446). Результаты эксперимента с мишенью показали, что с увеличением «сложности» пучка, качество регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка остается на том же уровне (σ=0,429 и δ=0,411). Значения интенсивности излучения в эксперименте с мишенью может отличаться от истинного на 60%, положение и размеры пучка практически не определяются (рисунки 3.2.8 и 3.2.9).

Разница полученных результатов (рисунки 3.2.6 – 3.2.9) обусловлена зависимостью эффективности генерации регистрируемого света от угла влета электрона в рабочую область детектирующего элемента. Так как применяемый в эксперименте электронный пучок расходящийся, угол влета электрона в диэлектрический материал изменялся в зависимости от положения детектирующего элемента. На рисунке 3.2.10 показана разница в направлении движения электронов, относительно оси детектирующего элемента при его различных местоположениях в случае расходящегося пучка.

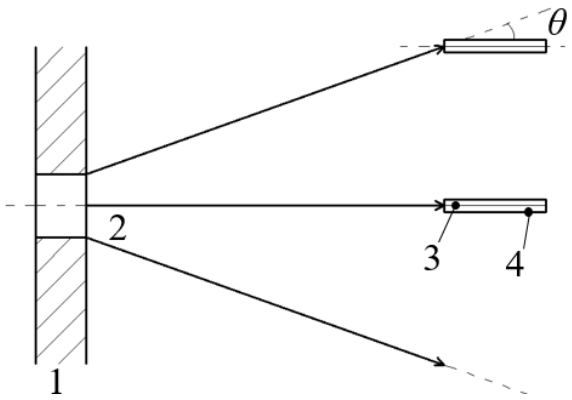

Рисунок 3.2.10 – Изменение угла влета электрона в рабочую область детектора в случае расходящегося пучка: 1 – коллиматор;
2 – расходящийся электронный пучок; 3 – детектирующий элемент;
4 – свинцовая защита детектора

Из рисунка 3.2.9 видно, что электроны попадают в рабочую область детектора под разными углами в зависимости от его положения. Максимальный угол генерации излучения Вавилова-Черенкова зависит от среды и скорости первичных частиц и определяется по формуле [112]:

$$\sin\theta = \frac{1}{n\beta}, \qquad (3.1)$$

где n – показатель преломления среды, β – отношение скорости частицы к скорости света.

При этом число черенковских фотонов dN, испущенных частицей на единице пути dx в интервале длин волн $\lambda_1 \div \lambda_2$ определяется соотношением [113]:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha Z_1^2 \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1\lambda_2}\left[1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\bar{\lambda})}\right], \qquad (3.2)$$

где $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}\ln\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; α – постоянная тонкой структуры, характеризующая силу электромагнитного взаимодействия и определяющаяся следующим образом: $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137{,}036$; Z_1 – величина заряда налетающей частицы; β – отношение скорости частицы к скорости света ($\beta = \vartheta/\mathrm{c}$); n – показатель преломления среды.

На рисунке 3.2.11 показана схема генерации излучения Вавилова-Черенкова в рабочей области оптоволоконного детектора.

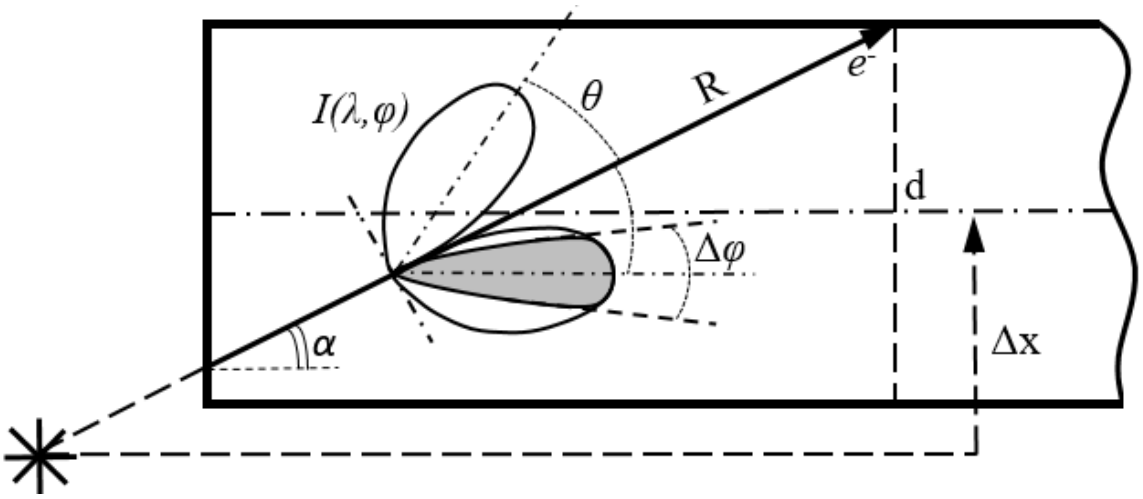

Рисунок 3.2.11 – Схема генерации излучения Вавилова-Черенкова в оптоволоконном детекторе

На рисунке 3.2.11 $I(\lambda, \varphi)$ – интенсивность излучения Вавилова-Черенкова с длиной волны λ, генерирующееся под углом φ. Как показано на рисунке 3.2.11, угол входа электрона в рабочую область (α) зависит от расположения детектора относительно центральной оси пучка (Δx). Этот угол определяет длину пути электрона в диэлектрической среде (R) и, следовательно, число сгенерированных черенковских фотонов.

Оптоволоконный кабель сконструирован таким образом, чтобы предотвращать распространение фотонов, направление движения которых отличается от направления центральной оси фибера. Допустимый диапазон этих углов ($\Delta\varphi$) для используемого фибера составляет от -5 до +5 градусов. Таким образом, количество черенковских фотонов, сгенерированных в оптоволоконном детекторе и зарегистрированных ФЭУ, определяется интегралом функции $I(\lambda, \varphi)$ в диапазоне углов $\Delta\varphi$ (серая область на рисунке 3.2.11). Совокупность описанных эффектов оказывает комплексное влияние на результат измерения характеристик пучка с помощью оптоволоконных детекторов.

Описанный эффект зависимости эффективности генерации излучения Вавилова-Черенкова от угла влета частицы хорошо просматривается на рисунке 3.2.6б. В центре пучка под прямым падением электронов на торец фибера эффективность генерации излучения ниже (меньше значение интенсивности), чем на краях пучка при увеличении угла падения, что обуславливает симметричность

полученного распределения относительно центра пучка (рисунки 3.2.6, 3.2.7б и 3.2.7в).

3.2.4 Исследование возможности регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью диэлектрического фибера методом многоуглового сканирования

Для оценки возможности определения параметров пучка с помощью диэлектрического фибера методом многоуглового сканирования было измерено энергетическое распределение электронов в поперечном сечении пучка в геометрии при перпендикулярном расположении фибера относительно оси распространения пучка (рисунок 3.2.12).

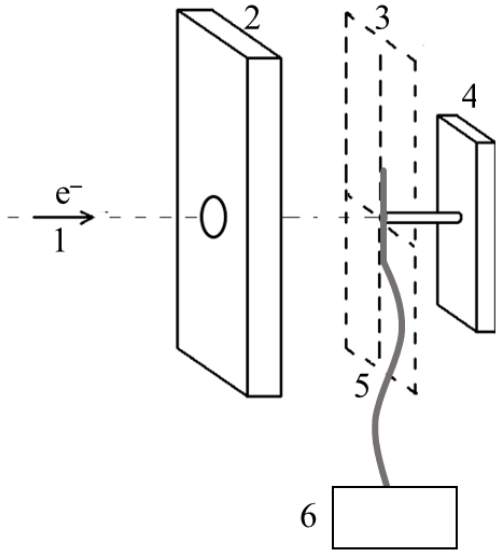

Рисунок 3.2.12 – Схема установки для измерения параметров пучка методом многоуглового сканирования:

1 – ускоренный пучок электронов; 2 – коллиматор;

3 – плоскость сканирования; 4 – система позиционирования оптоволокна;

5 – оптоволокно; 6 – система детектирования и оцифровки сигнала.

В результате измерения горизонтального профиля пучка данной геометрии были получены результаты, представленные на рисунке 3.2.13.

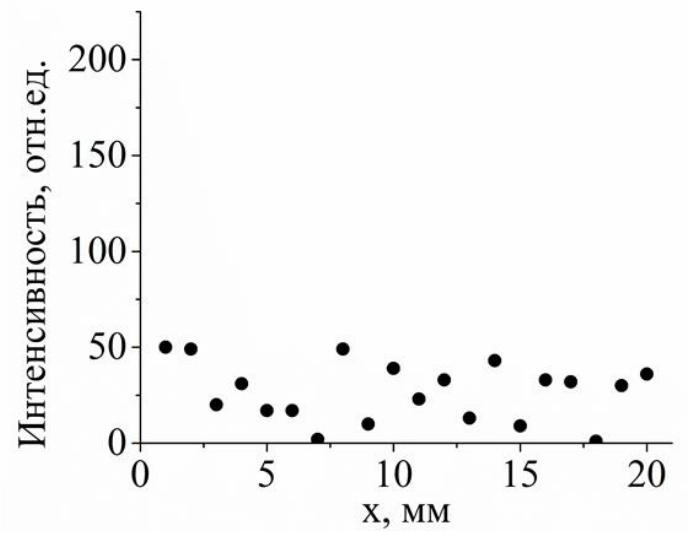

Рисунок 3.2.13 – Результаты измерения профиля электронного пучка с помощью диэлектрического фибера

На рисунке 3.2.13 не просматривается никакой корреляции с положением пучка и все полученные значения находятся в пределах фоновых в соответствии с рисунками 3.2.7 и 3.2.9. Таким образом, определение параметров электронного пучка с помощью диэлектрического фибера методом многоуглового сканирования не представляется возможным.

На следующем этапе работы в качестве детектирующего элемента было предложено использовать сцинтилляционный сканирующий элемент, так как эффективность генерации сцинтилляционных фотонов слабо зависит от угла влета электрона в тело детектора.

3.3. Регистрация энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью сцинтилляционного проволочного детектора

На следующем этапе было принято решение изготовить сцинтилляционный детектирующий элемент, в теле которого под действием ионизирующего излучения будут генерироваться сцинтилляционные фотоны, интенсивность которых будет пропорциональна интенсивности первичного излучения.

3.3.1 Проведение эксперимента на основе сцинтилляционного элемента

В эксперименте в качестве источника излучения использовался Микротрон ТПУ [89], характеристики выведенного пучка которого описаны в разделе 3.1.1.

После выходного окна электронный пучок проходил через коллиматор круглой формы с диаметром 10 мм и толщиной 50 мм. Регистрация энергетического распределения электронного пучка в поперечном сечении проводилась на расстоянии 50 мм от коллиматора. В первом эксперименте проводилась регистрация энергетического распределения электронов в поперечном сечении коллимированного пучка, во втором эксперименте часть коллимированного пучка была экранирована мишенью. На рисунке 3.3.1 представлена геометрия эксперимента, размеры приведены в сантиметрах.

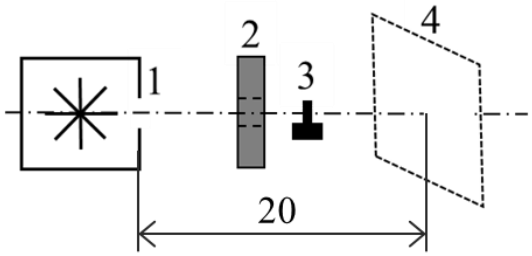

Рисунок 3.3.1 – Геометрия эксперимента: 1 – источник электронов, 2 – коллиматор, 3 – мишень, 4 – плоскость детектирования

Сканирующее устройство представляло собой тонкий сцинтилляционный детектирующий элемент с размерами 2×6×150 мм^3, который был изготовлен вручную из сцинтиллятора BC-408 фирмы Saint-Gobain [114]. На рисунке 3.3.2 представлен внешний вид детектирующего элемента.

Рисунок 3.3.2 – Внешний вид детектирующего сцинтилляционного элемента

В таблице 3.3.1 представлены основные характеристики сцинтиллятора BC-408 фирмы Saint-Gobain.

Таблица 3.3.1 – Основные характеристики сцинтиллятора BC-408

Базовый полимер	Поливинилтолуол
Плотность, г/см^3	1,023
Показатель преломления	1,58
Детектируемое излучение	Рентгеновское излучение, α- и β-излучение, заряженные частицы, космические лучи, мюоны, протоны
Световыход, %	64
Время нарастания, нс	0,9
Время затухания, нс	2,1
Максимум спектра высвечивания, нм	425

Сгенерированные в рабочей обрасти сцинтиллятора световые фотоны передавались по оптоволоконному кабелю в кремниевый ФЭУ (характеристики ФЭУ описаны в разделе 3.2.1) [106]. В работе использовался оптоволоконный кабель фирмы Shenzhen Amer Lighting Technology Co. [115], рабочий объем которого изготовлен из полиметилметакрилата (ПММА пластик) [116] с диаметром 6 мм. Далее сигнал с ФЭУ поступал на спектрометрическое устройство СУ-05 [107] фирмы НЦП «Аспект», которое оснащено импульсным спектрометрическим усилителем УИС-04 [108] и амплитудно-цифровым преобразователем БПА-04 [109]. Сигнал после усиления и аппаратной обработки передавался на ПК. На рисунке 3.3.2 представлена схема установки для регистрации энергетического распределения электронного пучка в поперечном сечении.

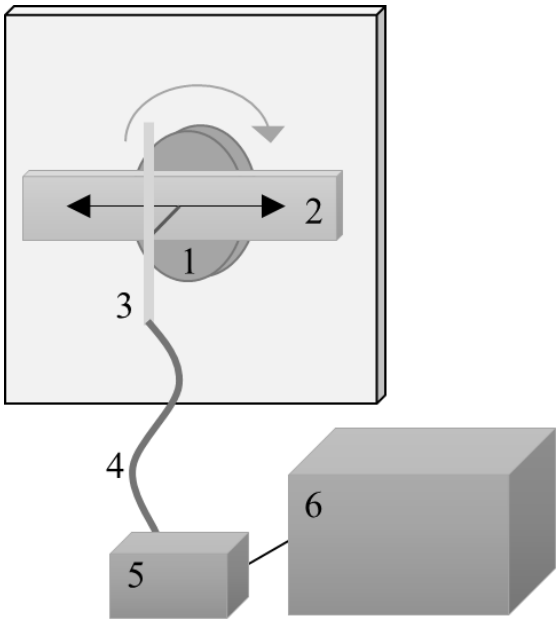

Рисунок 3.3.3 – Схема экспериментальной установки на основе сцинтиллятора: 1 – поворотная платформа; 2 – линейный транслятор; 3 – сцинтилляционный элемент; 4 – оптоволокно; 5 – ФЭУ; 6 – спектрометрическое устройство

Сцинтилляционный элемент смещался в плоскости перпендикулярной оси пучка на 25 мм поступательно, шаг углового смещения составлял 10°. В эксперименте использовался моторизированный линейный транслятор 8MT175 фирмы Standa [90, 91], характеристики которого описаны в разделе 3.1.1 (таблица 3.1.1), и моторизованная поворотная платформа 8MR190-2 [117], характеристики которой представлены в таблице 3.3.2.

Таблица 3.3.2 – Характеристики моторизованной поворотной платформы 8MR190-2

Характеристика	Значение, единица измерения
Угол вращения	360°
Разрешение на полный шаг	0,6′
Максимальная скорость вращения	8 об/мин
Мёртвый ход	0
Качание	0,5′
Эксцентричность	10 мкм

В эксперименте движение детектирующего элемента было непрерывным, а скорость выбиралась таким образом, чтобы за 2 секунды детектор проходил расстояние 1 мм. Полученные за 2 секунды сигналы усреднялись для повышения точности получаемых результатов.

Для сравнения полученных результатов были проведены измерения энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью пленочных дозиметров Gafchromic EBT2 [92], принцип действия и характеристики которых описаны в разделах 1.5 и 3.1.1.

3.3.2 Результаты эксперимента, полученные с помощью сцинтилляционного сканирующего детектора

В процессе каждого эксперимента в данном разделе и в разделе 4 был получен набор профилей пучка, количество которых соответствует количеству углов измерения. Для подготовки синограммы, каждое измеренное значение представляется графически в виде пикселя в градациях серого, при этом цвет выбирается таким образом, что максимальное значение в матрице соответствует белому, а минимальное – черному. Далее из этих пикселей последовательно собираются строчки с шириной, равной количеству измерений под заданным углом. Из строчек составляется двумерное изображение, ширина которого в пикселях равна количеству шагов детектора, а длина – количеству проекций.

В экспериментах в данном разделе были получены наборы из 19 зависимостей интенсивности излучения от положения (смещения и ориентации) сцинтилляционного элемента. Первый эксперимент проводился на пучке, прошедшем через коллиматор круглой формы, во втором эксперименте часть коллимированного пучка была экранирована мишенью. На рисунке 3.3.4 представлены результаты, полученные в обоих экспериментах в виде синограмм.

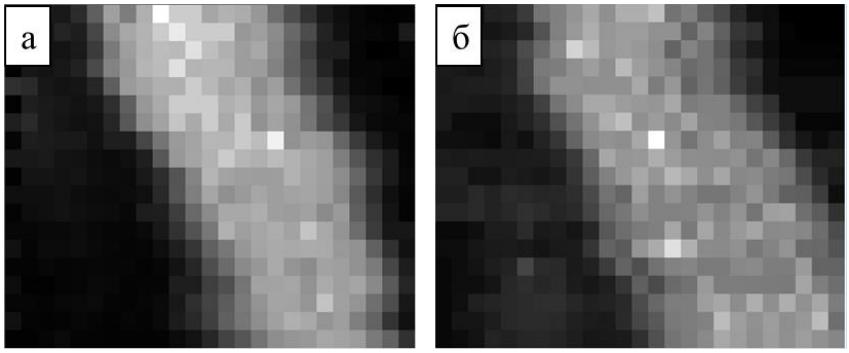

Рисунок 3.3.4 – Результаты сканирования электронного пучка сцинтилляционным элементом, представленные в виде синограмм: а – без мишени, б – с мишенью

На рисунке 3.3.5 представлена форма коллимированного электронного пучка, полученная с помощью пленочного дозиметра и при помощи предлагаемого метода. Пунктирными линиями на рисунках обозначена форма пучка.

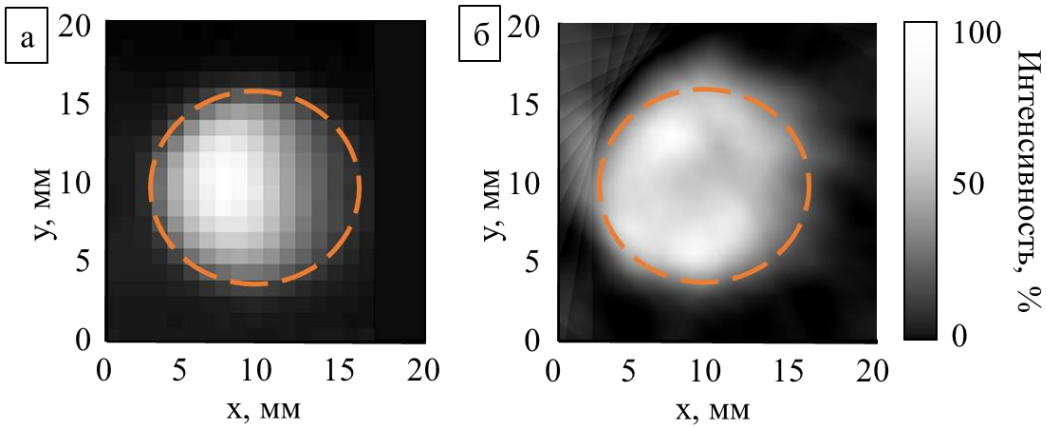

Рисунок 3.3.5 – Энергетические распределения электронов в поперечном сечении коллимированного пучка, полученные с помощью:
а – дозиметрических пленок; б – сцинтилляционный детектор

В данном разделе разрешение измерения, полученного пленочным дозиметром равно 1 мм, что соответствует ожидаемому разрешению измерения предложенным методом, так как шаг смещения детектора равен 1 мм. Для сравнения полученных результатов (рисунок 3.3.5) матрицы значений интенсивности были смещены таким образом, чтобы центр «горячего пятна» пучка находился в одной ячейке.

По формулам (2.3б) и (2.4) были определены среднеквадратичное отклонение и евклидово расстояние результатов, которые составили 0,371 и 0,359 соответственно. Для сравнения результатов на рисунке 3.3.6 представлены

горизонтальные профили пучка, в легенде ВС-408 – результаты, полученные с помощью сцинтилляционного детектора.

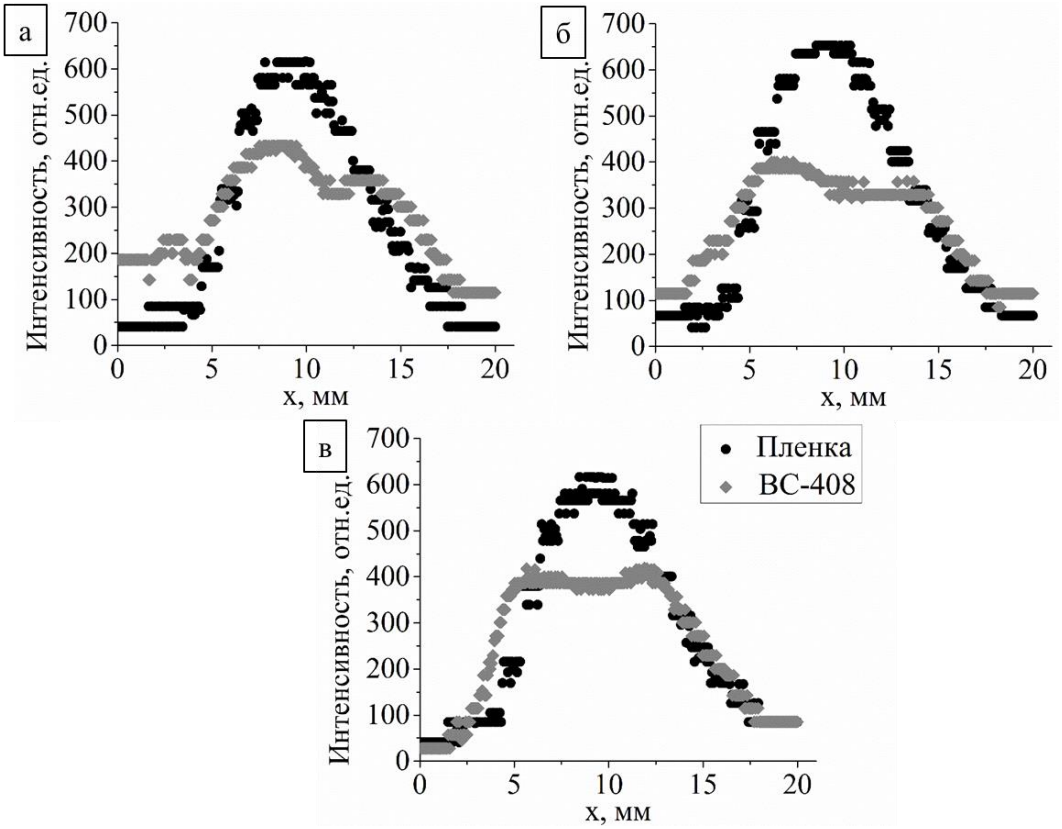

Рисунок 3.3.6 – Поперечные профили коллимированного пучка, измеренные пленочными дозиметрами и сцинтилляционной детектора:

а – y = 8 мм; б – y = 10мм; в – y = 12 мм

Здесь y – это смещение положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунок 3.3.5). На рисунке 3.3.6 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки.

Также для оценки метода был проведен второй эксперимент с деформированным электронным пучком. Для этого на пути пучка была размещена металлическая мишень, частично перекрывающая его. В толщине мишени электронный пучок полностью поглощался.

На рисунке 3.3.7 представлена форма электронного пучка с мишенью, полученная с помощью пленочного дозиметра и при помощи предлагаемого метода. Пунктирными линиями на рисунках обозначена форма пучка.

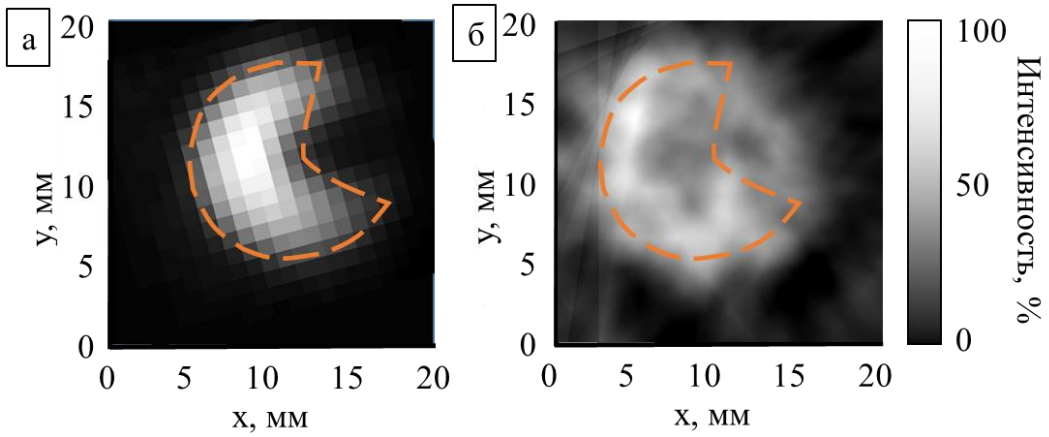

Рисунок 3.3.7 – Энергетические распределения электронов в поперечном сечении пучка с мишенью, полученные с помощью: а – дозиметрических пленок; б – сцинтилляционного детектора

Среднеквадратичное отклонение и евклидово расстояние результатов составили 0,427 и 0,448 соответственно. На рисунке 3.3.8 представлены горизонтальные профили пучка.

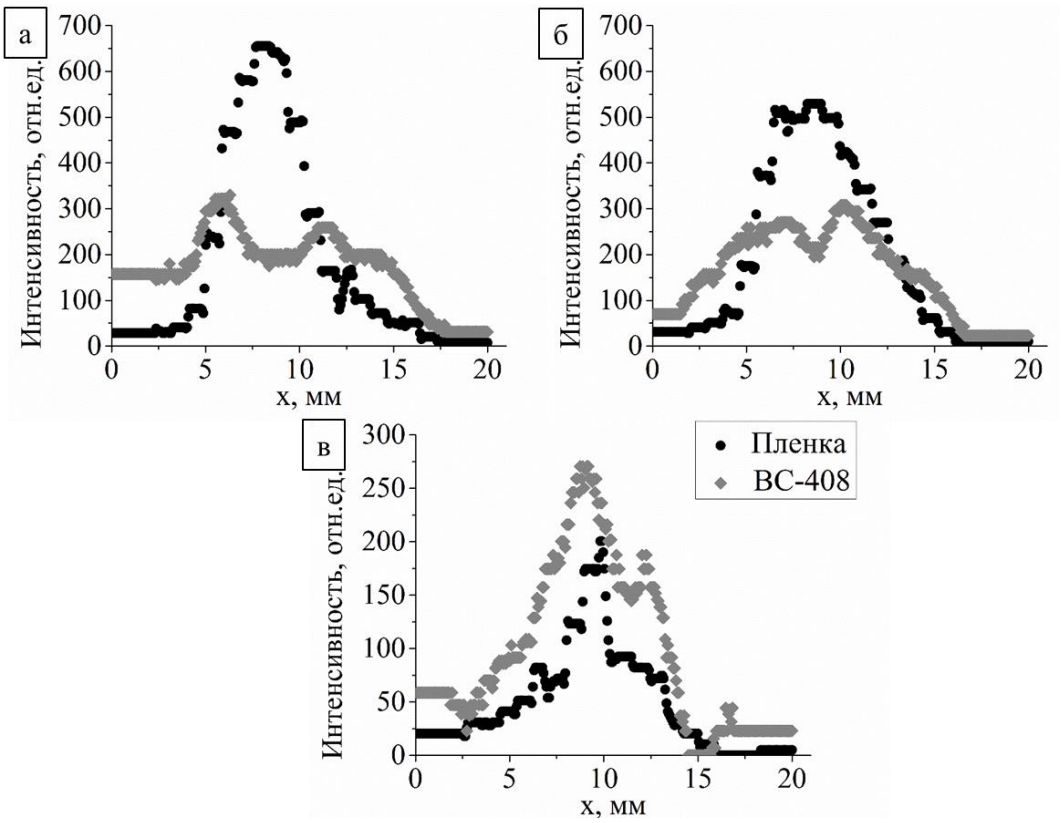

Рисунок 3.3.8 – Поперечные профили пучка с мишенью, измеренные пленкой и сцинтилляционным элементом: а – y = 8 мм; б – y = 10мм; в – y = 12 мм

Здесь y – это смещение положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунок 3.3.7). На рисунке 3.3.8 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки (результаты измерения, представленные в виде матриц, нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в обоих матрицах были равны).

3.3.3 Анализ результатов экспериментов, проведенных с использованием сцинтилляционного сканирующего детектора

Из рисунков 3.3.5 и 3.3.6 видно, что метод пригоден для регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка, разница полученных результатов обусловлена разрешением детектора на основе сцинтиллятора, которое определяется толщиной детектирующего элемента, а также большим количеством вторичных фотонов, образующихся в объеме коллиматора, которые пленка не может зафиксировать из-за малой толщины. Во избежание погрешностей при проведении измерения, связанных с генерацией излучения Черенкова в объеме оптоволокна, кабель был экранирован свинцовой фольгой, однако, в области соединения сцинтиллятора и оптоволокна его экранирование не представлялось возможным. В связи с этим, при положениях детектора в областях черенковских углов электроны могли попадать в область оптоволокна и генерировать излучение Вавилова-Черенкова, за счет этого на рисунках 3.3.5б и 3.3.6 видно, что границы пучка размыты.

На рисунке 3.3.7б прослеживается горячее пятно в области открытого пучка, однако, качество полученного результата недостаточно высокое, в связи с влиянием факторов, описанных выше. В объеме металлической мишени, перекрывавшей пучок, генерировалось вторичное гамма-излучение, которое также генерировало сцинтилляционные фотоны в объеме детектора, в связи с этим на рисунке 3.3.7б просматривается не полное отсутствие интенсивности, а спад интенсивности в области расположения мишени (около 40%).

Для оценки результатов регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка, с учетом выше описанных факторов, влияющих на результат реконструкции, данные были нормированы таким образом, чтобы 40% уровень интенсивности равнялся 0%, а максимум сохранил свое значение. На рисунке 3.3.9 представлены результаты полученной обработки. Пунктирными линиями на рисунках обозначена форма пучка.

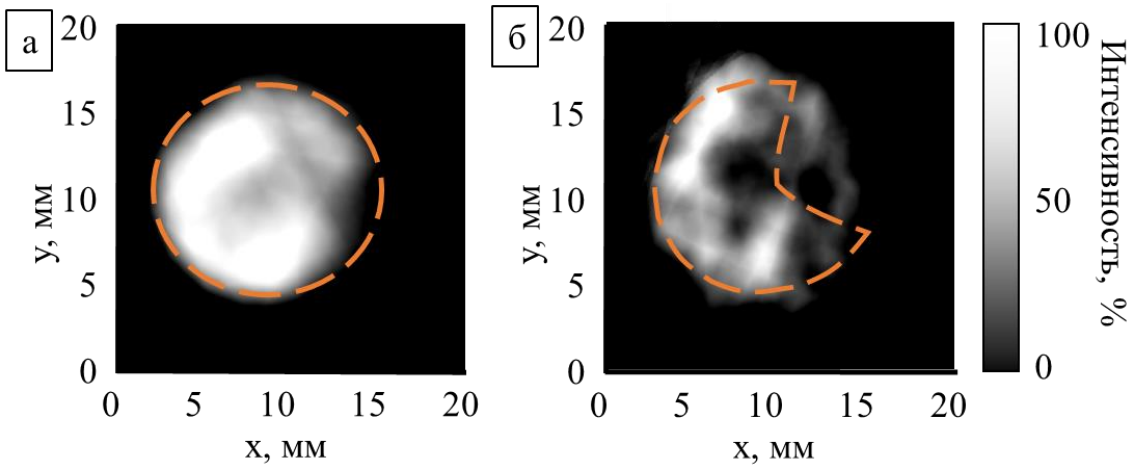

Рисунок 3.3.9 – Перенормированные результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка

а – коллимированного; б – с мишенью

После обработки результатов были определены их среднеквадратические отклонения и евклидовы расстояния от результатов, полученных с помощью пленочных дозиметров, которые были равны 0,271 и 0,299 для коллимированного пучка без мишени и 0,361 и 0,357 для коллимированного пучка с мишенью.

Далее были получены горизонтальные и вертикальные профили по центру коллимированного пучка (рисунок 3.3.10) и пучка с мишенью (рисунок 3.3.11), полученные с помощью пленок, сцинтиллятора, а также после обработки.

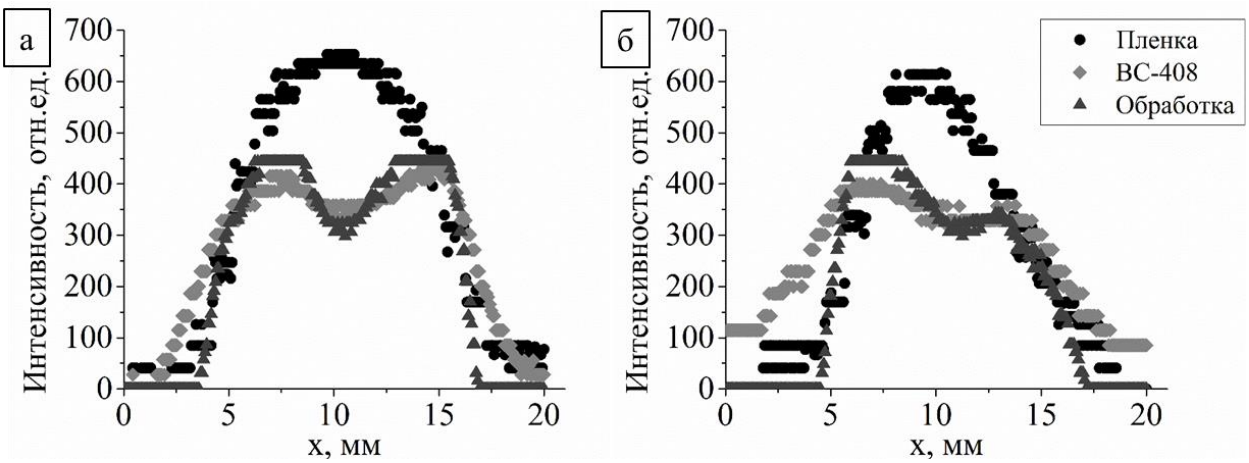

Рисунок 3.3.10 – Поперечные профили коллимированного пучка, полученные с помощью пленочных дозиметров (Пленка), сцинтилляционный элемент (ВС-408) и после обработки (Обработка):

а – вертикальный (x = 9 мм); б – горизонтальный (y = 10 мм)

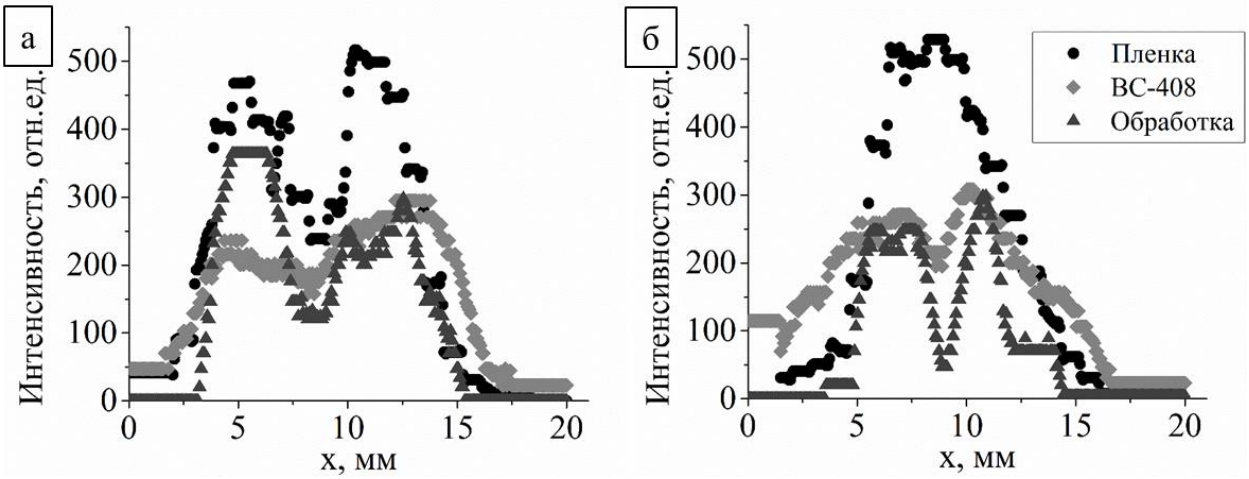

Рисунок 3.3.11 – Поперечные профили пучка с мишенью, полученные с помощью пленочных дозиметров (Пленка), сцинтилляционный элемент (ВС-408) и после обработки (Обработка):

а – вертикальный (x = 9 мм); б – горизонтальный (y = 10 мм)

На рисунках 3.3.10 и 3.3.11 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки (результаты измерения, представленные в виде матриц, нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в обоих исходных матрицах были равны). Здесь x и y – это смещения положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунки 3.3.5, 3.3.7, 3.3.9).

Полученные результаты после корректировки данных экспериментов без мишени и с мишенью (рисунки 3.3.9, 3.3.10 и 3.3.11) показывают, что с помощью сцинтилляционного элемента можно проводить измерения размеров пучка и определять его положение с точностью до 2 мм, что сопоставимо с разрешением детектора и шагом сканирования. Несмотря на заметные различия в профилях, рисунки 3.3.5 – 3.3.11 демонстрируют возможность оценки поперечных профилей и размеров электронных пучков при помощи созданной экспериментальной установки.

3.4 Сравнение результатов, полученных с помощью всех разработанных детекторов

Основными критериями сравнения полученных результатов были выбраны среднеквадратическое отклонение σ (формула (2.3б)) и евклидово расстояние δ (формула (2.4)). В таблице 3.4.1 приведены сравнения σ и δ результатов, полученных с помощью всех разработанных экспериментальных установок.

Таблица 3.4.1 – Значения количественных оценок качества результатов, полученных с помощью всех разработанных экспериментальных установок

Детектирующий элемент	$\sigma_{коллим}$	$\delta_{коллим}$	$\sigma_{мишень}$	$\delta_{мишень}$
Металлический сканирующий элемент	0,365	0,386	0,461	0,474
Диэлектрический фибер	0,432	0,446	0,429	0,411
Сцинтилляционный элемент до корректировки	0,371	0,359	0,427	0,448
Сцинтилляционный элемент после корректировки	0,271	0,299	0,361	0,357

В таблице $\sigma_{коллим}$ и $\delta_{коллим}$ – значения выбранных критериев, полученных в экспериментах на коллимированном пучке без мишени, $\sigma_{мишень}$ и $\delta_{мишень}$ – значения выбранных критериев, полученных в экспериментах на коллимированном пучке с мишенью.

По результатам, приведенным в таблице 3.4.1, видно, что постобработка полученных изображений может существенно улучшить результат.

Было принято решение в дальнейшей работе для апробации метода многоуглового сканирования пучка использовать детектор на основе сцинтилляционного элемента. Также в целом, применение детектора на основе сцинтилляционного элемента для регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка показало неплохие результаты (рисунки 3.3.5 – 3.3.11), однако, вклад вторичного излучения, генерируемого при ускорении и выводе промышленных электронных пучков, не позволяет получить достоверный результат измерения. В связи с этим, на следующем этапе работы были проведены экспериментальные исследования на рентгеновском пучке и на электронном пучке. Стоит отметить, что данные ограничения связанны с разработанным детектором и созданной экспериментальной установкой, и не являются ограничением предложенного метода.

Результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [118-124].

ГЛАВА 4. РЕГИСТРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПУЧКА МЕТОДОМ МНОГОУГЛОВОГО СКАНИРОВАНИЯ

В данной главе проведены экспериментальные исследования по апробации метода многоуглового сканирования с помощью экспериментальной установки, основанной на применении сцинтилляционного детектирующего элемента. Для оценки работоспособности метода было принято решение использовать «стабильные» пучки. В данной работе пучок будет считаться «стабильным», если энергетическое распределение ионизирующего излучения в его поперечной плоскости меняется за время проведения измерения не более чем на 5%. Помимо того, что в данной главе используются «стабильные» пучки, они также будут иметь сложную форму, так как в третьей главе было показано, что энергетическое распределение излучения в поперечном сечении коллимированного пучка круглой формы можно измерить даже с учетом множества факторов, оказывающих негативный эффект на результат измерения (разделы 3.1, 3.2, 3.3). Для изменения формы пучка в каждом эксперименте данной главы часть пучка будет экранироваться с помощью различных мишеней. В данной главе для регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка используется экспериментальная установка на основе сцинтиллятора, которая подробно описана в разделе 3.3.1.

В данной главе представлены результаты и анализ экспериментов, которые проводились на импульсном рентгеновском пучке с характерными размерами 20х20 мм^2, на электронном пучке с характерными размерами 50х50 мм^2, на рентгеновском пучке постоянного действия с характерными размерами 20х20 мм^2.

В данной главе разрешение (r) результатов регистрации распределения интенсивности излучения в поперечном сечении пучка, полученных с помощью пленочных дозиметров определяются размером пикселя изображения, а разрешение результатов, полученных методом многоуглового сканирования пучка определяется шагом детектора.

4.1. Применение метода многоуглового сканирования на импульсном рентгеновском пучке

На первом этапе исследования по апробации метода многоуглового сканирования был проведен эксперимент по регистрации энергетического распределение излучения в поперечном сечении импульсного рентгеновского пучка. В качестве источника излучения был выбран рентгеновский аппарат РАП 160-5.

4.1.1 Проведение эксперимента на импульсном рентгеновском пучке

В эксперименте в качестве источника излучения использовался универсальный переносной рентгеновский аппарат – РАП 160-5, работающий в импульсном режиме [125]. Характеристики источника рентгеновского излучения представлены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Характеристики рентгеновского аппарата РАП-160-5

Характеристика	Значение, единицы измерения
Максимальное анодное напряжение	160 кВ
Диапазон регулировки анодного напряжения	40 – 160 кВ
Диапазон регулировки анодного тока	0,4 – 5 мА
Номинальная мощность трубки	0,8 кВт
Размер фокусного пятна	1,2×1,2 мм
Угол раствора рабочего пучка	40°
Мощность экспозиционной дозы	не менее 0,14 Гр/мин при анодном напряжении 160 кВ и токе анода 3,5 мА на расстоянии 0,5 м от выходного окна

Параметры рентгеновского пучка в эксперименте составили: анодный ток – 1 мА, анодное напряжение – 130 кВ.

В эксперименте использовалась детектирующая система, разработанная для эксперимента по регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка с помощью сцинтилляционного элемента, описанная в разделе 3.3. Схема детектирующей системы представлена на рисунке 3.3.3. Экранирование световода в данном случае не было необходимым, так как световод располагался, таким образом, чтобы рентгеновский пучок не взаимодействовал с материалом кабеля в любом положении. Также рентгеновское излучение полностью поглощалось в объеме коллиматора и не генерировало вторичного излучения, в отличии от высокоэнергетических электронов.

После выходного окна рентгеновский пучок проходил через коллиматор с отверстием круглой формы с диаметром 20 мм и длинной 50 мм. Плоскость измерения профилей пучка находилась на расстоянии 50 мм от коллиматора. На рисунке 4.1.1 показана установка, созданная для эксперимента на рентгеновском аппарате.

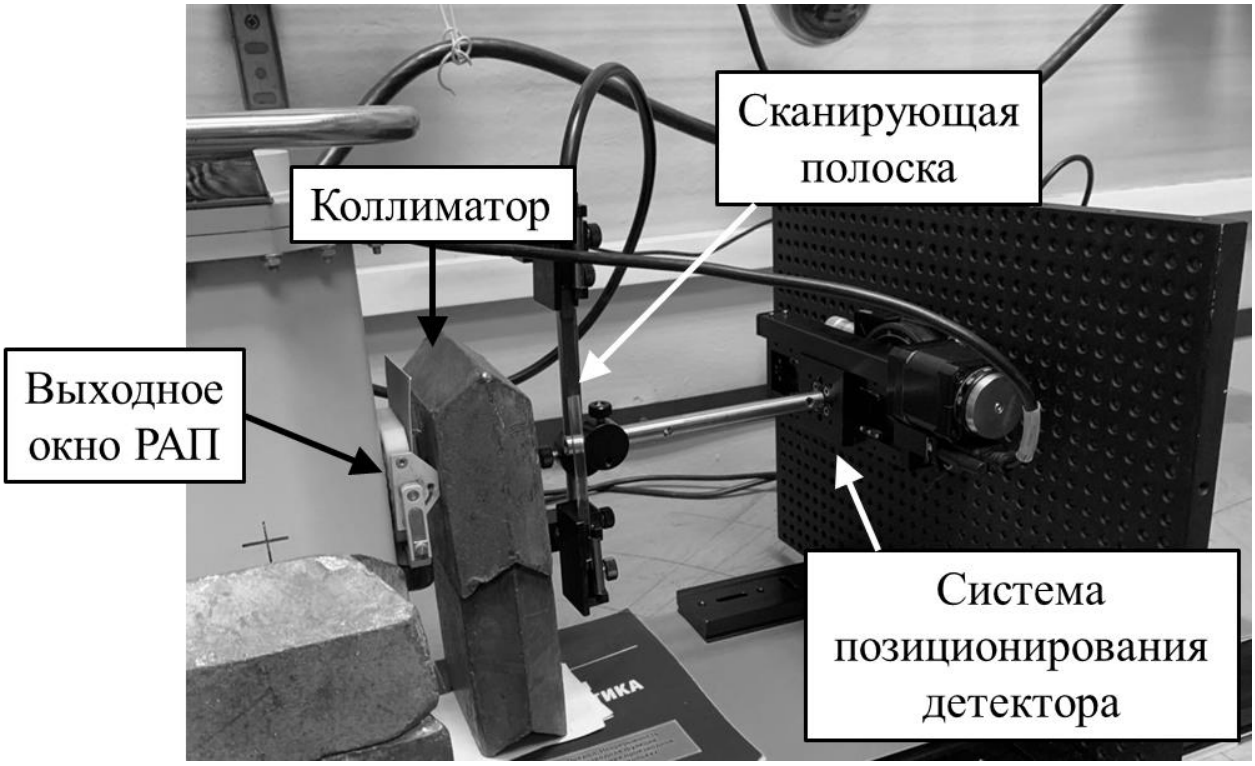

Рисунок 4.1.1 – Установка для проведения эксперимента на рентгеновском аппарате

В эксперименте использовался моторизированный линейный транслятор 8MT193-100 фирмы Standa [90, 126], характеристики которого представлены в таблице 4.1.2 и моторизованная поворотная платформа 8MR190-2 [117], характеристики которой описаны в разделе 3.3.1 (таблица 3.3.1).

Таблица 4.1.2 – Характеристики моторизированного линейного транслятора 8MT193-100

Характеристика	Значение, единица измерения
Диапазон перемещения	100 мм
Шаг ведущего винта	0,5 мм
Разрешение на полном шаге	2,5 мкм
Разрешение на 1/8 шага	0,31 мкм
Максимальная скорость	10 мм/сек
Максимальная нагрузка	8 кг

В эксперименте сцинтилляционный элемент смещался в плоскости перпендикулярной оси пучка на 40 мм поступательно. При проведении измерения параметров пучка движение детектирующей полоски было непрерывным, а скорость выбиралась таким образом, чтобы за 10 секунд детектор проходил расстояние 2 мм. Полученные за 10 секунды сигналы суммировались, таким образом повышалась точность получаемых результатов, а разрешение составило 2 мм. В эксперименте сигнал увеличивался в 17 раз.

Для сравнения полученных результатов были проведены измерения энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка с помощью пленочных дозиметров Gafchromic EBT3 [93], принцип действия и характеристики которых описаны в разделах 1.5 и 3.1.1.

4.1.2 Результаты эксперимента на импульсном рентгеновском пучке

На первом этапе для оценки возможности регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка с помощью разработанной детектирующей системы было проведено поперечное сканирование

коллимированного рентгеновского пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях, перпендикулярных оси его распространения (рисунок 4.1.2).

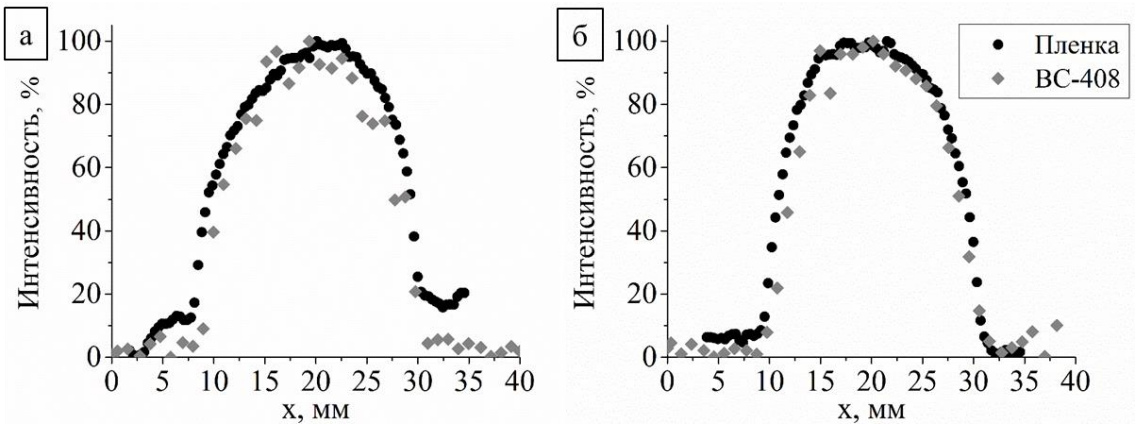

Рисунок 4.1.2 – Результаты поперечного сканирования импульсного рентгеновского пучка, полученные при помощи пленки (Пленка) и экспериментальной установкой (ВС-408):
а – горизонтальное направление и б – вертикальное направление

На рисунке 4.1.2 данные были нормированы на максимум в каждом измерении. Полученные профили являются интегральными, то есть значение в каждой точке равно сумме значений интенсивности в соответствующем столбце (горизонтальное сканирование) или строке (вертикальное сканирование).

Рисунок 4.1.2 показывает согласие результатов, полученных с помощью пленки и созданной установкой: размер пучка определяется с точностью до 2 мм, что соответствует шагу сканирования, а разброс полученных в эксперименте результатов по интенсивности составил не более 10%, что может быть улучшено за счет увеличения статистики при наборе данных. При этом полученные результаты сканирования рентгеновского пучка показывают возможность измерения пространственных характеристик как рентгеновских, так и электронных пучков с помощью детектирующей системы, разработанной в ходе диссертационной работы.

Для апробации метода многоуглового сканирования было принято решение проводить сканирование пучка сложной формы, для чего на пути коллимированного пучка была установлена металлическая мишень, частично его перекрывающая. Мишень выбрана таким образом, чтобы рентгеновский пучок

максимально поглощался в ней. В эксперименте шаг углового смещения составлял 4°, таким образом, было получено 46 проекций и суммарный угол сканирования был равен 180°. На рисунке 4.1.3 показаны результаты сканирования пучка, представленные в виде синограммы. Процесс обработки данных для получения синограмм описан в разделе 3.3.1.

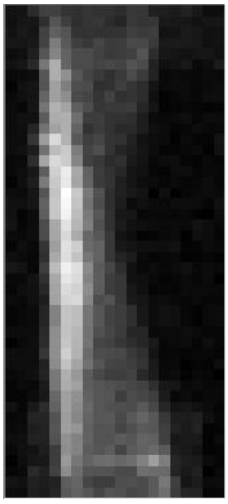

Рисунок 4.1.3 – Результаты сканирования импульсного рентгеновского пучка в виде синограммы

Полученные данные (рисунок 4.1.3) были реконструированы. На рисунке 4.1.4 представлена форма рентгеновского пучка, полученная с помощью пленочного дозиметра и методом многоуглового сканирования.

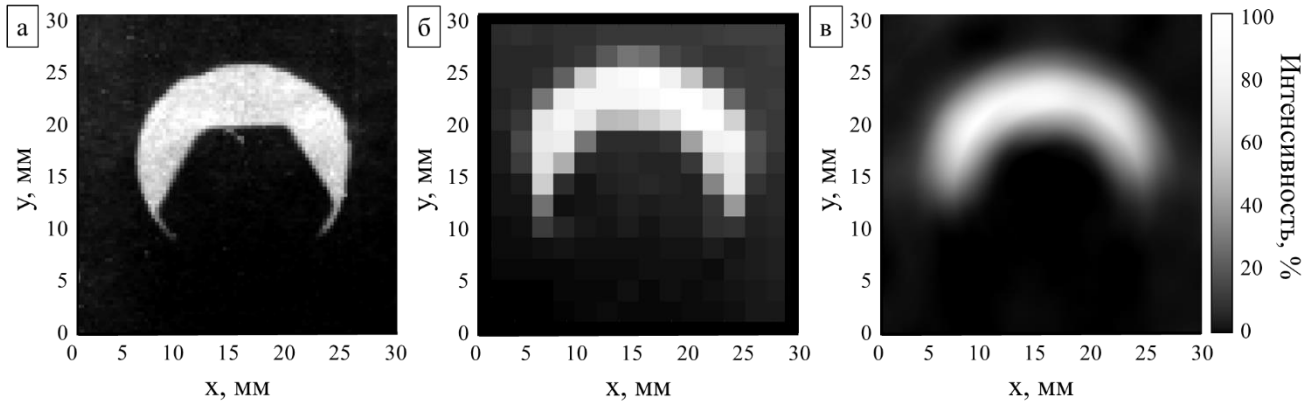

Рисунок 4.1.4 – Результаты регистрации распределения интенсивности излучения в поперечном сечении импульсного рентгеновского пучка с помощью:
а – дозиметрической пленки при r = 0,5 мм; б – дозиметрической пленки при r = 2 мм; в – метода многоуглового сканирования при r = 2 мм

Полученные результаты были проанализированы аналогично результатам, полученным во второй главе. По формулам (2.3б) и (2.4) были определены среднеквадратичное отклонение и евклидово расстояние результатов данного эксперимента, которые составили 0,164 и 0,165 соответственно. Для сравнения результатов на рисунке 4.1.5 представлены горизонтальные профили рентгеновского пучка. На рисунке 4.1.5 для наглядности экспериментально полученные точки были соединены линиями.

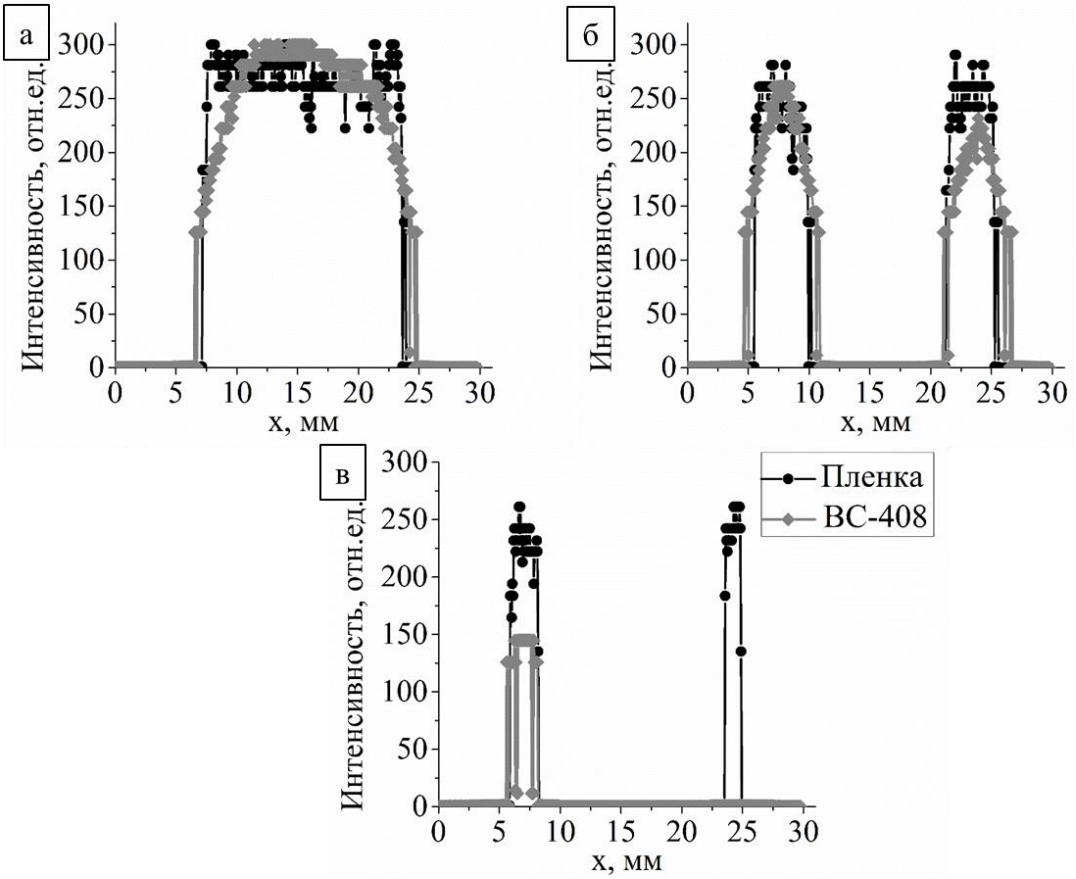

Рисунок 4.1.5 – Поперечные профили рентгеновского пучка, измеренные пленками (Пленка) и методом многоуглового сканирования (ВС-408):

а – y = 9 мм; б – y = 15 мм; в – y = 21 мм

Здесь y – это смещение положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунок 4.1.4). На рисунке 4.1.5 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки (результаты измерения, представленные в виде матриц, нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в матрицах были равны).

4.1.3 Анализ результатов эксперимента на импульсном рентгеновском пучке

При сравнении полученных значений σ=0,164 и δ=0,165 (рисунки 4.1.4а и 4.1.4в) со значениями, полученными ранее (таблица 3.4.1), видно, что качество полученного результата значительно выше среднего, что позволяет говорить о работоспособности предложенного метода.

По рисунку 4.1.4 видно, что размеры пучка совпадают с точностью не более 2 мм. Однако, распределения интенсивности излучения в поперечном сечении пучка, полученные методом многоуглового сканирования (рисунок 4.1.4в), имеют существенно меньшую контрастность, в то время как распределения, полученные с помощью пленочного дозиметра (рисунок 4.1.4а), спадают резко. Разрешение экспериментальной установки, основанной на сцинтилляторе равно 2 мм и определяется толщиной детектирующего элемента. При сравнении результатов, полученных с помощью предложенного метода (рисунок 4.1.4в) и пленочного дозиметра при таком же разрешении (рисунок 4.1.4б) видно, что качество результатов, полученных методом многоуглового сканирования, нисколько не уступает.

На основе полученных данных было определено оптимальное количество проекций, необходимых для получения достоверных результатов за минимальное время, для экспериментальной установки на основе сцинтилляционного проволочного детектора. Для этого результаты были реконструированы из одного набора экспериментальных данных, но при разном количестве проекций. Поиск $n_{опт}$ осуществлялся по выведенной ранее формуле (2.10). Таким образом, были получены реконструкции энергетического распределения излучения в поперечном сечении импульсного рентгеновского пучка при количестве проекций 45, 22, 11, 5 и найдены по формулам (2.3б) и (2.4) их среднеквадратические отклонения и евклидовы расстояния от результатов, полученных с помощью пленочных дозиметров. Далее были построены аппроксимационные кривые (достоверность аппроксимации – R^2=0,96 и R^2 =0,92 соответственно) и рассчитано $n_{опт}$. Таким образом, оптимальное количество проекций для получения достоверных

результатов с помощью экспериментальной установки с сцинтилляционным проволочным детектором равно 18, при этом угловой шаг должен составлять 10°.

4.2. Применение метода многоуглового сканирования на электронном пучке

На следующем этапе был проведен эксперимент по апробации метода многоуглового сканирования, в котором в качестве источника излучения был выбран ускоритель электронов, предназначенный для медицинских целей.

4.2.1 Проведение эксперимента на электронном пучке бетатрона

В эксперименте в качестве источника излучения использовался бетатрон с выведенным пучком электронов КБМ-6М, разработанный в Томском политехническом университете. Индукционный ускоритель позволяет выводить электронные пучки со средней энергией электронов 4 и 6 МэВ, с частотой 100 и 200 Гц. Мощность дозы на выходе из ускорителя при энергии электронов 6 МэВ и частоте 200 Гц составляет 7 Гр/мин. Ускоритель оснащен набором коллиматоров круглой формы с диаметрами от 3 до 10 см с шагом 1 см. Однородность электронного пучка в поперечном сечении составляет 2%.

Схема эксперимента на электронном пучке бетатрона представлена на рисунке 4.2.1.

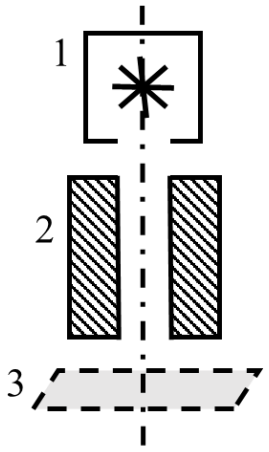

Рисунок 4.2.1 – Схема эксперимента по измерению поперечного профиля выведенного пучка бетатрона: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – плоскость измерения профиля пучка

Средняя энергия выведенных электронов в эксперименте составила 4 МэВ. После выходного окна электронный пучок проходил через коллиматор круглой

формы с диаметром 40 мм, расстояние от оси до края коллиматора составляла 67 см. Плоскость измерения профиля пучка находилась на расстоянии 30 мм от коллиматора.

Сцинтилляционный элемент смещался в плоскости перпендикулярной оси пучка на 50 мм поступательно, шаг углового смещения составлял 10°, таким образом было получено 19 проекций и суммарный угол сканирования был равен 180°.

В эксперименте движение детектирующей полоски было непрерывным, а скорость выбиралась таким образом, чтобы за 2 секунды детектор проходил расстояние 2 мм. Полученные за 2 секунды сигналы суммировались, таким образом повышалась точность получаемых результатов. На рисунке 4.2.2 представлен внешний вид экспериментальной установки.

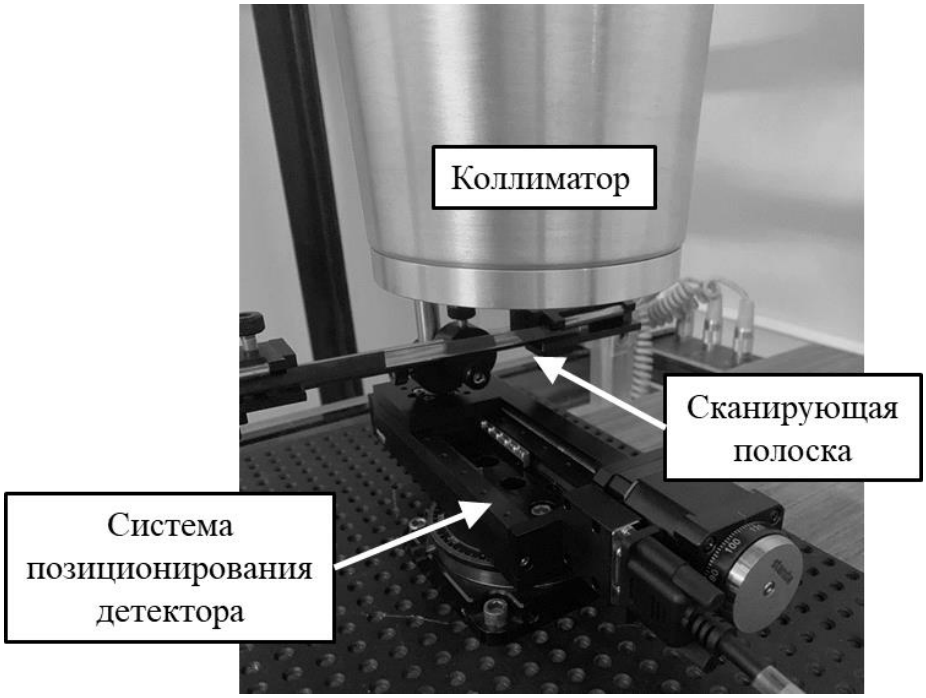

Рисунок 4.2.2 – Установка для проведения эксперимента на выведенном электронном пучке бетатрона

Для сравнения полученных результатов были проведены измерения энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью пленочных дозиметров Gafchromic EBT3 [93], принцип действия и характеристики которых описаны в разделах 1.5 и 3.1.1.

4.2.2 Результаты эксперимента на электронном пучке бетатрона

Как и в предыдущем эксперименте для апробации метода многоуглового сканирования проводилось измерение пучка сложной формы, поэтому на его пути была установлена металлическая мишень, частично экранирующая пучок. На рисунке 4.2.3 представлена форма электронного пучка сложной формы, полученная с помощью пленочного дозиметра и методом многоуглового сканирования.

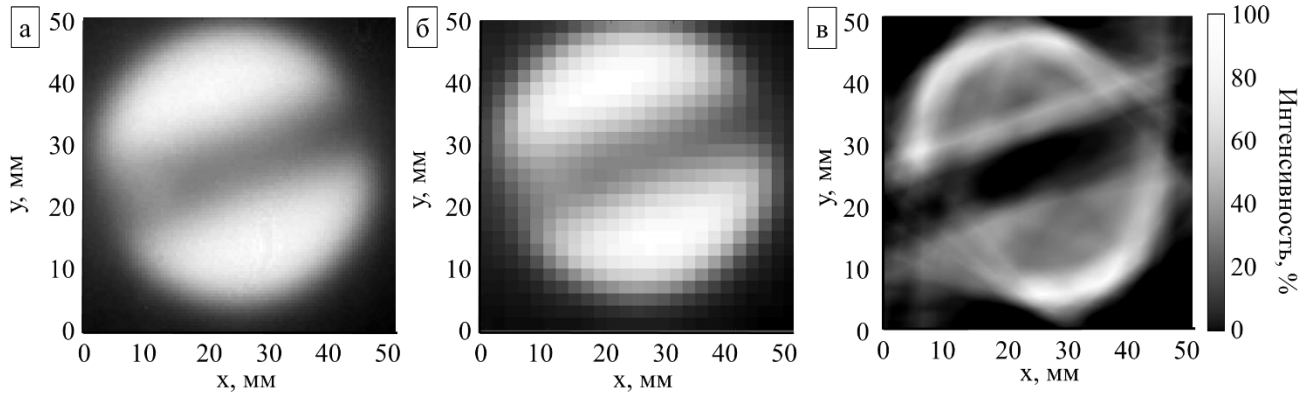

Рисунок 4.2.3 – Результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка, полученные с помощью: а – дозиметрической пленки при r = 0,5 мм; б – дозиметрической пленки при r = 2 мм; в – метода многоуглового сканирования при r = 2 мм

Были рассчитаны значения критериев σ=0,264 и δ=0,266 для распределений, полученных в результате эксперимента на электронном пучке бетатрона.

Для сравнения результатов регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка с помощью пленочных дозиметров и методом многоуглового сканирования на рисунке 4.2.4 представлены горизонтальные профили пучка.

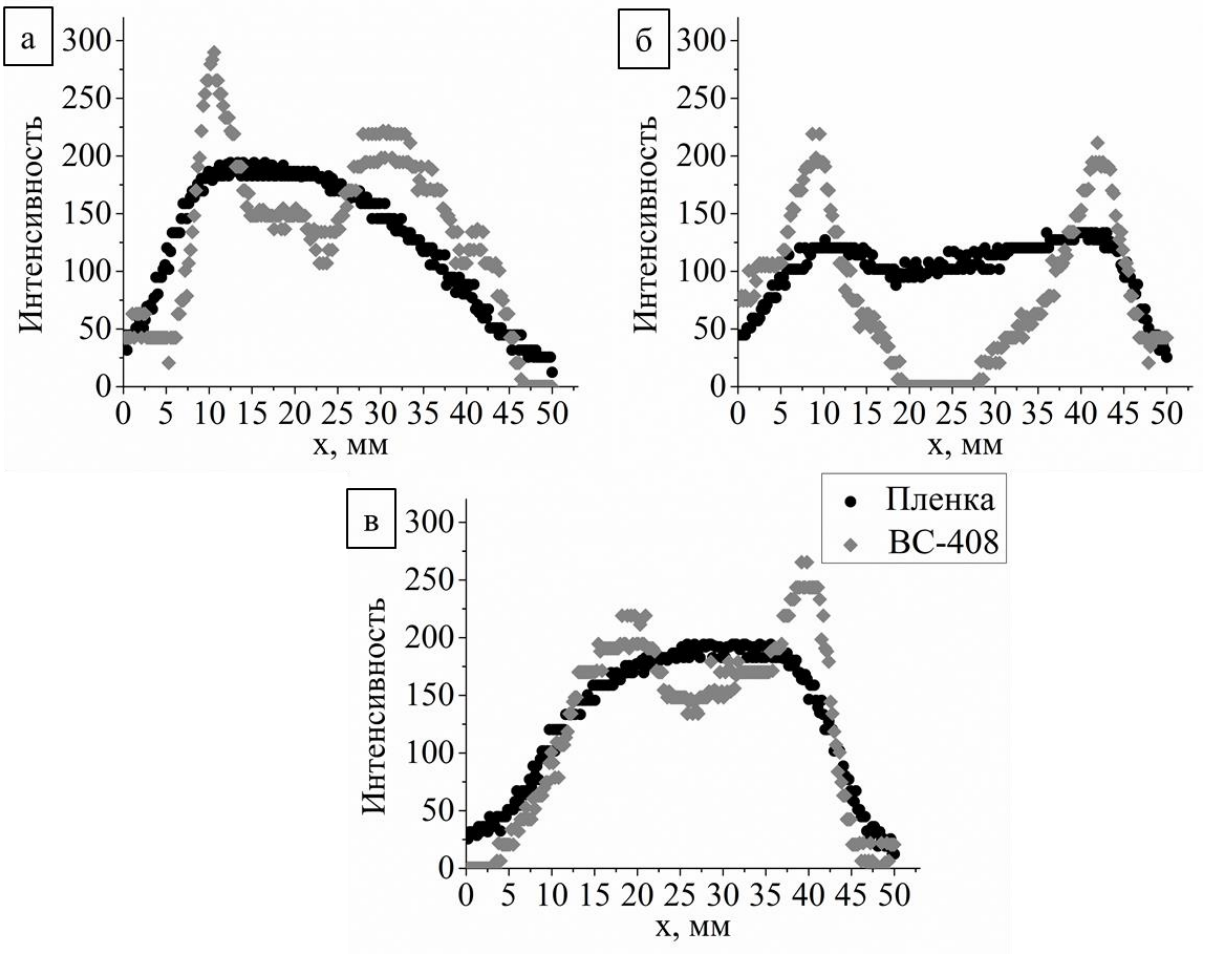

Рисунок 4.2.4 – Поперечные профили электронного пучка, измеренные пленочными дозиметрами и методом многоуглового сканирования:
а – y = 15 мм; б – y = 25 мм; в – y = 35 мм

Здесь y – это смещение положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунок 4.2.3). На рисунке 4.2.4 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки (результаты измерения, представленные в виде матриц, нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в матрицах были равны).

4.2.3 Анализ результатов эксперимента на электронном пучке бетатрона

При сравнении σ=0,264 и δ=0,266, полученных в результате эксперимента на электронном пучке бетатрона, со значениями, полученными ранее для электронных пучков сложной формы (значения $\sigma_{мишень}$ и $\delta_{мишень}$ в таблице 3.4.1),

видно, что качество полученного результата выше, что позволяет говорить о работоспособности предложенного метода.

Из рисунков 4.2.3 и 4.2.4 видно, что метод пригоден для регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка. Видно, что размер пучка определяется с точностью до 2 мм, что соответствует толщине сцинтилляционного детектора и шагу сканирования. Однако, измеренная методом многоуглового сканирования интенсивность в центральной области пучка меньше чем на его краях, что просматривается на рисунках 4.2.3 и 4.2.4. При этом высота пиков увеличивается в соответствии с увеличением интенсивности излучения (4.2.4а и 4.2.4в). Увеличение интенсивности на краях пучка может быть обусловлено генерацией излучения Вавилова-Черенкова в объеме световода, рассеянием электронов на краях коллиматора и генерацией электронами тормозного излучения в объеме коллиматора. Также увеличение интенсивности по краям пучка приводит к резкому спаду интенсивности в частично перекрытой области пучка по сравнению с результатами, полученных с помощью пленочного дозиметра.

Рисунки 4.2.3 и 4.2.4 показывают, что метод многоуглового сканирования позволяет с достаточной точностью зарегистрировать энергетическое распределение электронов в поперечном сечении пучка. Увеличение количества артефактов реконструкции по сравнению с экспериментом, описанным в разделе 4.1.1, обуславливается уменьшением времени сбора данных и уменьшением количества проекций.

4.3. Применение метода многоуглового сканирования на рентгеновском пучке постоянного действия

На заключительном этапе исследования по апробации метода многоуглового сканирования проводился эксперимент по регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении рентгеновского пучка постоянного действия. При этом на пути пучка была установлена мишень таким

образом, чтобы пучок имел четыре области с различными интенсивностями излучения.

4.3.1 Проведение эксперимента на рентгеновском пучке постоянного действия

В эксперименте использовался источник рентгеновского излучения, состоящий из рентгеновской трубки БСВ29 [127] и модуля рентгеновского генератора DXM60 фирмы Spellman [128]. Источник рентгеновского излучения оснащен системой водного охлаждения, что позволяет выводить стабильный пучок в течении длительного времени.

Характеристики рентгеновской трубки БСВ29 представлены в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1 – Характеристики рентгеновской трубки БСВ29

Характеристика	Значение, единицы измерения
Рабочее анодное напряжение	60 кВ
Размер фокусного пятна	0,4×0,8 мм
Материал мишени	Серебро

Характеристики модуля рентгеновского генератора DXM60 представлены в таблице 4.3.2.

Таблица 4.3.2 – Характеристики модуля рентгеновского генератора DXM60

Характеристика	Значение, единицы измерения
Входное напряжение	180 – 264 В переменного тока: 47–63 Гц при токе 4,3 А
Выходное напряжение	60 кВ
Диапазон регулировки анодного тока	1 – 10 мА
Номинальная мощность	600 Вт

Параметры рентгеновского пучка в эксперименте составили: анодный ток – 10 мА, анодное напряжение – 60 кВ.

В эксперименте использовалась детектирующая система, разработанная для эксперимента по регистрации энергетического распределения излучения в

поперечном сечении пучка с помощью сцинтилляционного элемента, описанная в разделе 3.3. Схема детектирующей системы представлена на рисунке 3.3.3.

После выходного окна рентгеновский пучок проходил через коллиматор с отверстием круглой формы с диаметром 20 мм и длинной 50 мм. Плоскость измерения профиля пучка находилась на расстоянии 40 мм от коллиматора. На рисунке 4.3.1 показан внешний вид установки для проведения эксперимента на рентгеновском пучке постоянного действия.

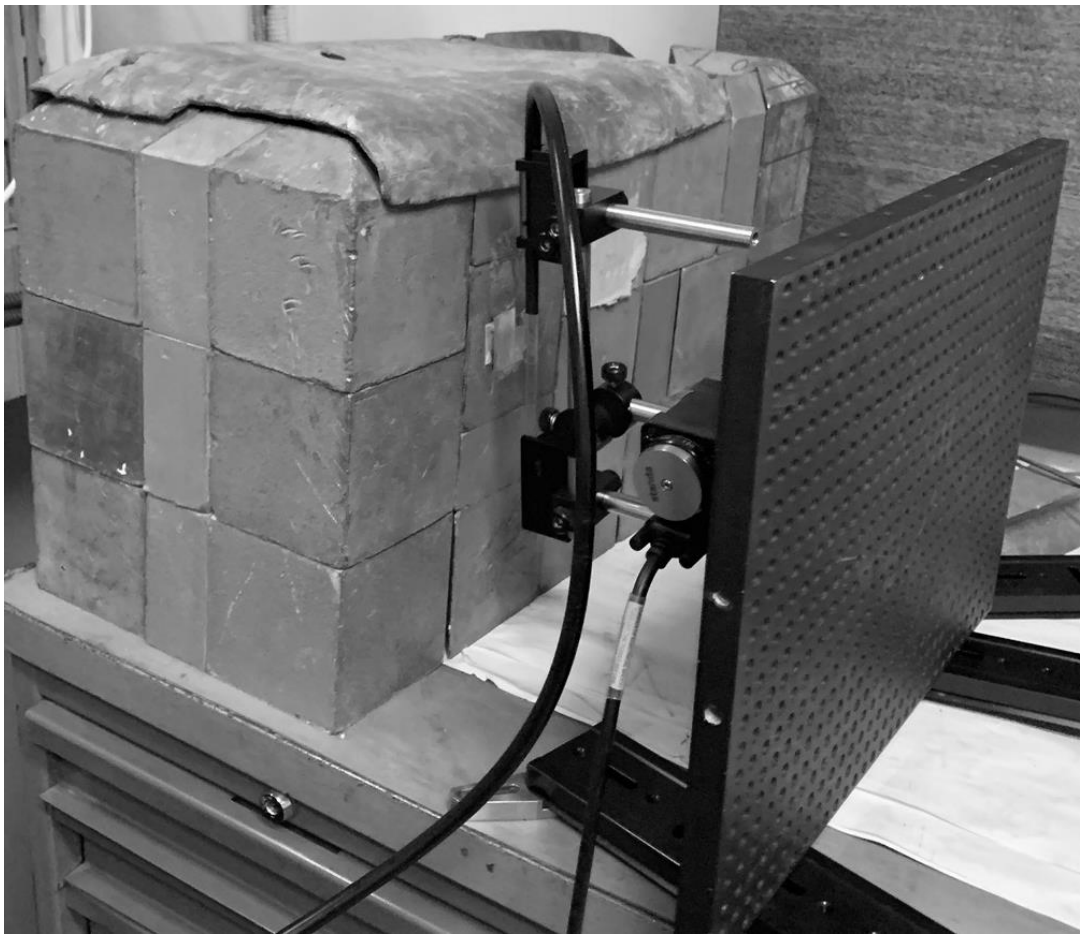

Рисунок 4.3.1 – Внешний вид установки для проведения эксперимента на рентгеновском пучке постоянного действия

В эксперименте использовались моторизированный линейный транслятор 8MT193-100 фирмы Standa [90, 126], характеристики которого представлены в разделе 4.1.1 (таблица 4.1.2) и моторизованная поворотная платформа 8MR190-2 [117], характеристики которой описаны в разделе 3.3.1 (таблица 3.3.1).

В эксперименте сцинтилляционный детектор смещался в плоскости перпендикулярной оси пучка на 64 мм поступательно. При проведении измерения

параметров пучка движение детектирующей полоски было непрерывным, а скорость выбиралась таким образом, чтобы за 10 секунд детектор проходил расстояние 2 мм. Полученные за 10 секунды сигналы суммировались, таким образом повышалась точность получаемых результатов, а разрешение составило 2 мм, которое обуславливается толщиной сцинтилляционного элемента. В эксперименте сигнал увеличивался в 12 раз.

Для сравнения полученных результатов были проведены измерения энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка с помощью пленочных дозиметров Gafchromic EBT3 [93], принцип действия и характеристики которых описаны в разделах 1.5 и 3.1.1.

4.3.2 Результаты эксперимента на рентгеновском пучке постоянного действия

Для апробации метода регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении рентгеновского пучка постоянного действия на основе многоуглового сканирования было принято решение проводить сканирование пучка сложной формы, для чего на пути коллимированного пучка была установлена мишень. Мишень была специально изготовлена, таким образом, чтобы пучок имел четыре области с различными энергетическими характеристиками. Мишень состояла набора алюминиевых фольг, которые располагались таким образом, чтобы обеспечить наличие четырех областей поглощения с толщинами алюминия: 0; 0,1; 0,2 и 0,3 мм. Толщина половинного ослабления рентгеновского пучка при использованных в эксперименте параметрах алюминием равна 0,2 мм. В эксперименте шаг углового смещения составлял 10°, таким образом, было получено 19 проекций и суммарный угол сканирования был равен 180°.

На рисунке 4.3.2 показаны результаты сканирования пучка, представленные в виде синограммы. Процесс обработки данных для получения синограмм описан в разделе 3.3.1.

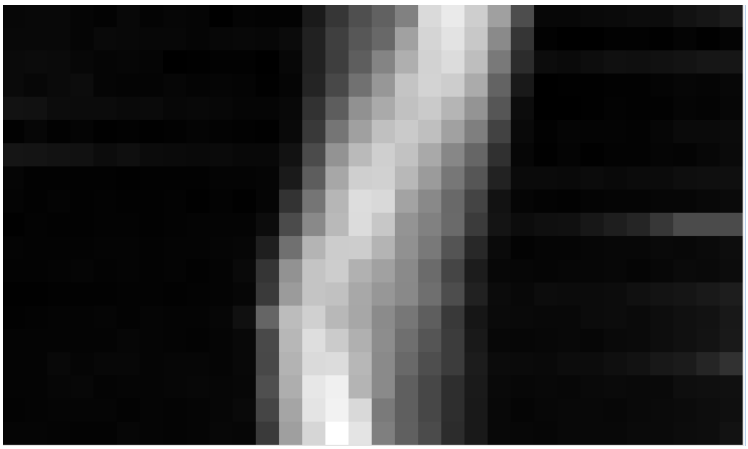

Рисунок 4.3.2 – Результаты сканирования рентгеновского пучка постоянного действия в виде синограммы

Полученные данные (рисунок 4.3.2) были реконструированы. На рисунке 4.3.3 представлена форма рентгеновского пучка постоянного действия, полученная с помощью пленочного дозиметра и методом многоуглового сканирования.

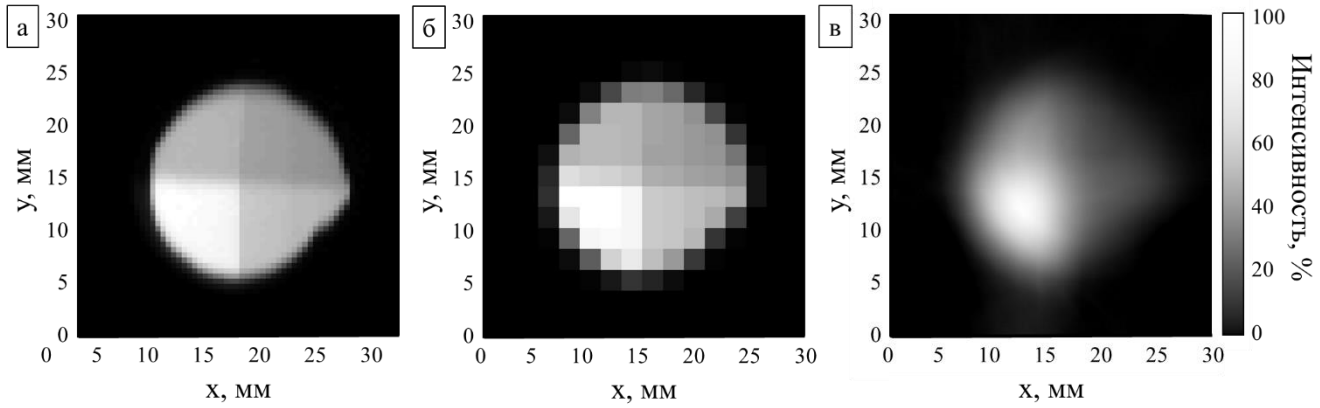

Рисунок 4.3.3 – Результаты регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении рентгеновского пучка постоянного действия с помощью: а – дозиметрической пленки при r = 0,5 мм; б – дозиметрической пленки при r = 2 мм; в – метода многоуглового сканирования при r = 2 мм

Полученные результаты были проанализированы аналогично результатам, полученным в третьей главе. Были определены среднеквадратичное отклонение и евклидово расстояние результатов эксперимента, которые составили 0,164 и 0,165 соответственно. Для сравнения результатов на рисунке 4.3.4 представлены горизонтальные профили рентгеновского пучка постоянного действия.

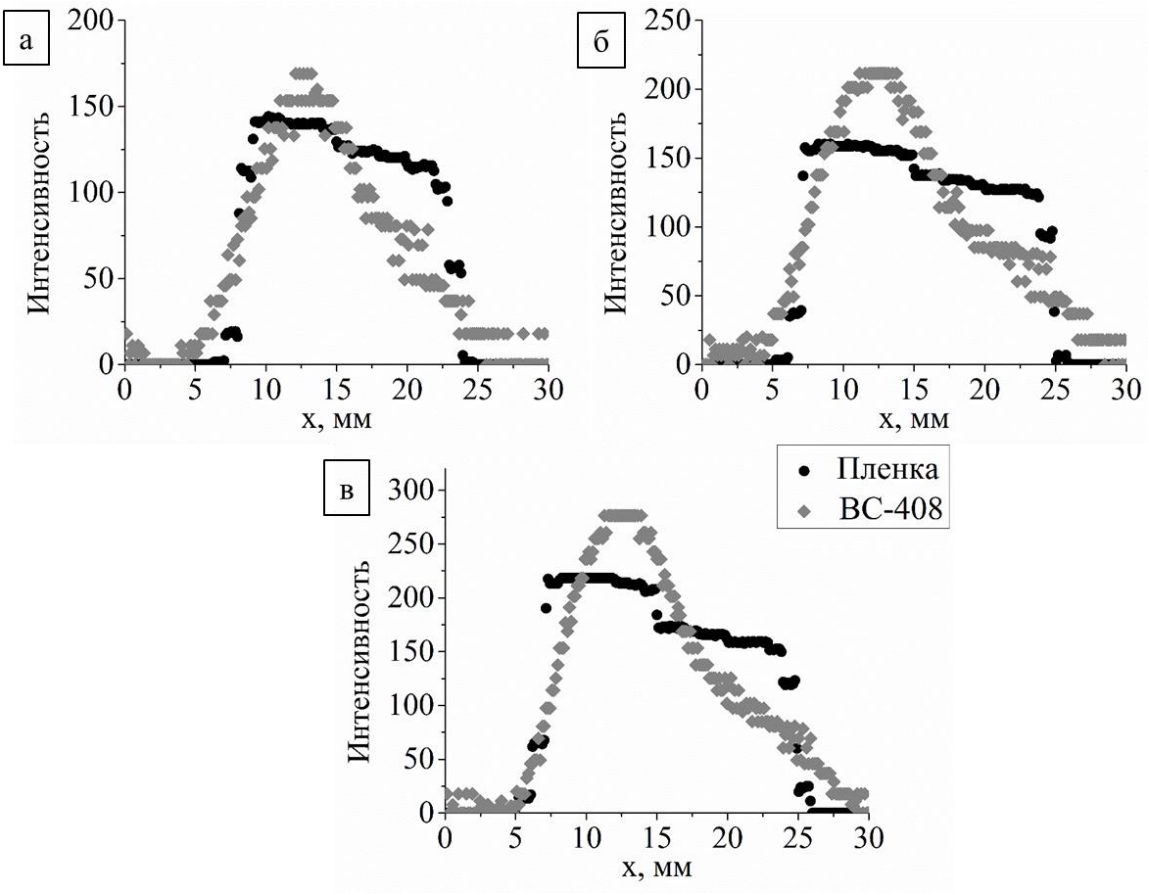

Рисунок 4.3.4 – Поперечные профили рентгеновского пучка, измеренные пленками (Пленка) и методом многоуглового сканирования (ВС-408):
а – y = 10 мм; б – y = 13,5 мм; в – y = 17 мм

Здесь y – это смещение положения поперечного профиля по соответствующей оси (смотри рисунок 4.3.3). На рисунке 4.3.4 по оси ординат отложена интенсивность, измеряемая в относительных единицах, полученная после нормировки (результаты измерения, представленные в виде матриц, нормированы таким образом, чтобы средние значения интенсивностей в матрицах были равны).

4.3.3 Анализ результатов эксперимента на рентгеновском пучке постоянного действия

При сравнении полученных σ=0,164 и δ=0,165 со значениями, полученными ранее (разделы 4.1 и 4.2, таблица 3.4.1), видно, что качество полученного результата значительно выше среднего, что позволяет говорить о

работоспособности предложенного метода по регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка.

На рисунке 4.3.3 видно, что полученные результаты позволяют определить форму и размеры рентгеновского пучка постоянного действия. По рисункам 4.3.3 и 4.3.4 можно определить размер рентгеновского пучка с точностью до 2 мм, что обусловлено разрешением детектирующего элемента. На рисунке 4.3.4 явно просматриваются горячие и холодные пятна, однако, разрешение детектора (2 мм) не позволяет определить их границы (рисунок 4.3.3а), в связи с этим на рисунке 4.3.4 кривые, полученные предложенным методом, имеют плавные переходы интенсивностей, в отличии от резких переходов кривых, полученных с помощью пленочного дозиметра. Значения интенсивности в каждой точке определяется с точностью не хуже 20%.

В целом, рисунки 4.3.3 и 4.3.4 показывают, что метод многоуглового сканирования позволяет с достаточной точностью зарегистрировать энергетическое распределение излучения в поперечном сечении пучка.

Результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [129-132].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационной работы был разработан и эффективно применен метод многоуглового сканирования для регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка. По полученным результатам можно изложить основные выводы:

1. Обратное преобразование Радона позволят реализовать и эффективно применить метод многоуглового сканирования для регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

2. Получено выражение для поиска оптимального количества проекций для достоверной регистрации пространственного распределения пучка за минимальное время, которое равно 10 для проведенного численного эксперимента и 18 для экспериментов, проведенных с помощью сцинтилляционного проволочного детектора.

3. Применение металлического проволочного сканера для регистрации пространственного распределения электронного пучка, которое позволяет с приемлемой точностью (до 2 мм) определить размер и положение «горячего пика» в поперечном сечении пучка, должно выполняться с учётом выявленных эффектов генерации электромагнитных наводок в металле, оказывающих влияние на результаты измерений.

4. Симметричное увеличение интенсивности зарегистрированного оптоволоконным кабелем излучения на краях коллимированного электронного пучка круглой формы обусловлено тем, что эффективность генерации излучения Вавилова-Черенкова в оптоволокне зависит от угла влета электронов в рабочую область.

5. Применение сцинтилляционного проволочного сканера позволяет проводить регистрацию пространственного энергетического распределения рентгеновского и электронного пучков в поперечном сечении с разрешением не хуже 2х2 мм^2.

В качестве практических рекомендации для эффективного применения метода многоуглового сканирования можно отметить следующее:

– для получения достоверных результатов по полученному в работе выражению можно определить оптимальное количество проекций для реализации метода многоуглового сканирования на конкретной экспериментальной установке;

– использование сцинтилляционного материала позволяет избежать влияния электромагнитных наводок, генерирующихся в теле детектора;

– использование сетчатого проволочного детектора позволит существенно сократить время детектирования;

– метод может быть реализован путем модернизации уже использующихся сканирующих детекторов в ускорительных установках, что позволит при минимальных доработках регистрировать не только профиль пучка, но и его пространственное энергетическое распределение.

Автор диссертации выражает глубокую признательность и благодарность своему научному руководителю кандидату физико-математических наук, доценту Стучеброву С.Г. за помощь и поддержку на всех этапах работы и многочисленные обсуждения аспектов исследования. Автор искренне благодарна сотрудникам Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Инженерной школы ядерных технологий и Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета Милойчиковой И.А., Черепенникову Ю.М., Потылицыну А.П., Вуколову А.В., Науменко Г.А., Шевелеву М.В., Чахлову С.В., Маликову Е.Л. за неоценимую помощь при выполнении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Флакус Ф.Н. Регистрация и измерение ионизирующих излучений – краткий экскурс в историю // Бюллетень МАГАТЭ. – 1981. – Т. 23. – №. 4. – С. 36-42.

2) Ronda C. R. Luminescence: from theory to applications. – John Wiley & Sons – 2007.

3) Wilhelmus V. A. Luminescent screen: пат. 2882413 США. – 1959.

4) Iversen A. H. Cellularized Luminescent structures: пат. 3936645 США. – 1976.

5) Стивен Т., Альберт С. Процесс формирования люминесцентного экрана: пат. 2451590 США. – 1948.

6) Gualtieri D. M., Lai S. T. Multi-layer faceted luminescent screens: пат. 4713577 США. – 1987.

7) Ozawa L. Determination of Self-Concentration Quenching Mechanisms of Rare Earth Luminescence from Intensity Measurements on Powdered Phosphor Screens //Journal of The Electrochemical Society. – 1979. – Т. 126. – №. 1. – С. 106-109.

8) Born P. J., Robertson D. S., Young I. M. Luminescent ceramic plates: пат. 4849639 США. – 1989.

9) Johnson C. D. The development and use of alumina ceramic fluorescent screens. – CM-P00059425, 1990. – №. CERN-PS-90-42-AR.

10) Bal C., Bravin E., Lefevre T. et al. Scintillating Screens Study for LEIR-LHC Heavy Ion Beams // Proc. of DIPAC 2005. Lyon, France – 2005.

11) Duggal A. R., Srivastava A. M. Luminescent display and method of making: пат. 6566808 США. – 2003.

12) Henderson T. M., Knoll G. F. Radiation-detection/scintillator composite and method of manufacture: пат. 4795910 США. – 1989.

13) Galves J. P., Gutierrez J. M. Process for producing a scintillator screen: пат. 4287230 США. – 1981

14) Michail C. et al. Measurement of the luminescence properties of Gd2O2S: Pr, Ce, F powder scintillators under X-ray radiation // Radiation Measurements. – 2014. – Т. 70. – С. 59-64.

15) Okabe S., Tabata T., Tsumori K. Beam Profile Measurement for Electron Accelerators // Japanese Journal of Applied Physics. – 1966. – Т. 5. – №. 1. – С. 68.

16) Брюининг Г. Физика и применение вторичной электронной эмиссии. – М.: Советское радио, 1958. – 192 с.

17) Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. – «Наука», 1969.

18) Бажанова Н.П., Кораблев В.В., Кудинов Ю.А. Актуальные вопросы вторично-эмиссионной спектроскопии. Учебное пособие – Л.: ЛПИ, 1985.– 88 с.

19) Cheymol B. Development of beam transverse prole and emittance monitors for the CERN LINAC4. – 2011. – №. CERN-THESIS-2011-289.

20) Potylitsyn A. P. Thomson scattering of coherent diffraction radiation by an electron bunch // Physical Review E. – 1999. – Т. 60. – №. 2. – С. 2272.

21) Boogert S. T. et al. Micron-scale laser-wire scanner for the KEK Accelerator Test Facility extraction line // Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams. – 2010. – Т. 13. – №. 12. – С. 122801.

22) Aryshev A. et al. Micron size laser-wire system at the ATF extraction line, recent results and ATF-II upgrade // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2010. – Т. 623. – №. 1. – С. 564-566.

23) Weilbach T. et al. Optical electron beam diagnostics for relativistic electron cooling devices // COOL. – 2011. – Т. 11. – С. 121.

24) Dai W. et al. Design study of an improved laser wire system for electron beam measurement // Chinese Physics C. – 2013. – Т. 37. – №. 10. – С. 108101.

25) Liu Y. et al. Laser wire beam profile monitor in the spallation neutron source (SNS) superconducting linac // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2010. – Т. 612. – №. 2. – С. 241-253.

26) Pozimski J., Gibson S. M. Particle Tracking for the FETS Laser Wire Emittance Scanner // IBIC2013, Oxford. – 2013.

27) Nazhmudinov R. M. et al. A multi-wirescanner test setup utilizing characteristic X-rays for charged particle and photon beam diagnostics // Journal of Instrumentation. – 2018. – Т. 13. – №. 12. – С. P12012.

28) Shintake T., Oide K., Yamamoto N. Experiments of Nanometer Spot Size Monitor at FFTB Using Laser Interferometry // Proc. of PAC 1995. Dallas, USA, 1995.

29) Смалюк В. В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях: учебное пособие – Новосибирск: Параллель, 2009 – 294 с.

30) Аванесов Г. А., Акимов В. В., Воронков С. В. Результаты испытаний ПЗС-матриц российского и зарубежного производства на источниках заряженных частиц // Механика, управление и информатика. – 2009. – №. 1. – С. 447-457.

31) Torino L., Iriso U. Transverse beam profile reconstruction using synchrotron radiation interferometry // Physical review accelerators and Beams. – 2016. – Т. 19. – №. 12. – С. 122801.

32) Trad G. Development and Optimisation of the SPS and LHC beam diagnostics based on Synchrotron Radiation monitors. – 2015. – №. CERN-THESIS-2014-390.

33) Qian J. P. et al. EAST equilibrium current profile reconstruction using polarimeter-interferometer internal measurement constraints // Nuclear Fusion. – 2016. – Т. 57. – №. 3. – С. 036008.

34) Naumenko G. et al. Detector for coherent synchrotron radiation measurements from separate electron bunches in a millimeter wavelength region // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2009. – Т. 603. – №. 1-2. – С. 35-37.

35) Potylitsyn A. P. Coherent diffraction radiation interferometry and short bunch length measurements // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2005. – Т. 227. – №. 1-2. – С. 191-197.

36) Shevelev M. et al. Coherent radiation spectrum measurements at KEK LUCX facility // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2015. – Т. 771. – С. 126-133.

37) Lekomtsev K. et al. Investigation of Coherent Diffraction Radiation from a dual target system at CTF3 and its application for longitudinal bunch profile diagnostics: дис. – University of London, 2012.

38) Amerio S. et al. Dosimetric characterization of a large area pixel segmented ionization chamber // Medical physics. – 2004. – Т. 31. – №. 2. – С. 414-420.

39) Spezi E. et al. Characterization of a 2D ion chamber array for the verification of radiotherapy treatments // Physics in Medicine & Biology. – 2005. – Т. 50. – №. 14. – С. 3361.

40) StarTrack with OmniPro-Advance. The universal QA solution [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.el-se.com/wp-content/uploads/2015/07/StarTrack.pdf

41) MatriXX – Universal Detector Array [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iba-dosimetry.com/product/matrixx-universal-detector-array/

42) Létourneau D. et al. Evaluation of a 2D diode array for IMRT quality assurance // Radiotherapy and oncology. – 2004. – Т. 70. – №. 2. – С. 199-206.

43) Jursinic P. A., Nelms B. E. A 2-D diode array and analysis software for verification of intensity modulated radiation therapy delivery // Medical Physics. – 2003. – Т. 30. – №. 5. – С. 870-879.

44) Monti A. F., Frigerio G. Dosimetric verification of 6 and 18 MV intensity modulated photon beams using a dedicated fluoroscopic electronic portal imaging device (EPID) // Radiotherapy and oncology. – 2006. – Т. 81. – №. 1. – С. 88-96.

45) Hesse B. M., Spies L., Groh B. A. Tomotherapeutic portal imaging for radiation treatment verification // Physics in Medicine & Biology. – 1998. – Т. 43. – №. 12. – С. 3607.

46) Cremers F. et al. Performance of electronic portal imaging devices (EPIDs) used in radiotherapy: image quality and dose measurements // Medical physics. – 2004. – T. 31. – №. 5. – C. 985-996.

47) Beaulieu L. et al. Current status of scintillation dosimetry for megavoltage beams // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing – 2013. – T. 444. – №. 1. – C. 012013.

48) Guillot M. et al. Spectral method for the correction of the Cerenkov light effect in plastic scintillation detectors: a comparison study of calibration procedures and validation in Cerenkov light-dominated situations // Medical physics. – 2011. – T. 38. – №. 4. – C. 2140-2150.

49) Archambault L. et al. Measurement accuracy and Cerenkov removal for high performance, high spatial resolution scintillation dosimetry // Medical physics. – 2006. – T. 33. – №. 1. – C. 128-135.

50) Beddar A. S., Mackie T. R., Attix F. H. Water-equivalent plastic scintillation detectors for high-energy beam dosimetry: I. Physical characteristics and theoretical considerations // Physics in Medicine & Biology. – 1992. – T. 37. – №. 10. – C. 1883.

51) Beddar A. S., Mackie T. R., Attix F. H. Water-equivalent plastic scintillation detectors for high-energy beam dosimetry: II. Properties and measurements // Physics in Medicine & Biology. – 1992. – T. 37. – №. 10. – C. 1901.

52) Beddar A. S. et al. Plastic scintillation dosimetry: optimization of light collection efficiency // Physics in Medicine & Biology. – 2003. – T. 48. – №. 9. – C. 1141.

53) Lambert J. et al. A plastic scintillation dosimeter for high dose rate brachytherapy //Physics in Medicine & Biology. – 2006. – T. 51. – №. 21. – C. 5505.

54) Lacroix F. et al. Clinical prototype of a plastic water-equivalent scintillating fiber dosimeter array for QA applicationsa // Medical physics. – 2008. – T. 35. – №. 8. – C. 3682-3690.

55) Bambynek M. et al. A high-precision, high-resolution and fast dosimetry system for beta sources applied in cardiovascular brachytherapy // Medical physics. – 2000. – T. 27. – №. 4. – C. 662-667.

56) Kirov A. S. et al. Towards two-dimensional brachytherapy dosimetry using plastic scintillator: New highly efficient water equivalent plastic scintillator materials // Medical physics. – 1999. – T. 26. – №. 8. – C. 1515-1523.

57) Williamson J. F. et al. Plastic scintillator response to low-energy photons // Physics in Medicine & Biology. – 1999. – T. 44. – №. 4. – C. 857.

58) Wang L. L. W. et al. Determination of the quenching correction factors for plastic scintillation detectors in therapeutic high-energy proton beams // Physics in Medicine & Biology. – 2012. – T. 57. – №. 23. – C. 7767.

59) Burke E. et al. The practical application of scintillation dosimetry in small-field photon-beam radiotherapy // Zeitschrift für Medizinische Physik. – 2017. – T. 27. – №. 4. – C. 324-333.

60) Cirrone G. A. P. et al. A Fast Monitoring system for Radiotherapeutic Proton Beams Based on Scintillating Screens and a CCD camera // IEEE Transaction on Nuclear Science. – 2003. – T. 51. – №. 4.

61) Cirrone G. A. P. et al. Deep characterization of a fast monitoring system for radiotherapeutic proton beams based on scintillating screens and a CCD camera // IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004. – IEEE, 2004. – T. 3. – C. 1752-1756.

62) Borca V. C. et al. Dosimetric characterization and use of GAFCHROMIC EBT3 film for IMRT dose verification // Journal of applied clinical medical physics – 2013. – T. 14. – №.2. – C. 158-171.

63) Zhu X. R. et al. Characteristics of sensitometric curves of radiographic films // Medical physics. – 2003. – T. 30. – №. 5. – C. 912-919.

64) Childress N. L., Rosen I. I. Effect of processing time delay on the dose response of Kodak EDR2 film // Medical physics. – 2004. – T. 31. – №. 8. – C. 2284-2288.

65) Zhabitsky V. M. Digital methods for diagnostics of longitudinal bunch parameters in synchrotrons // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2016. – T. 13. – №. 1. – C. 127-131.

66) Zhabitsky V. M. Methods of computer processing of experimental data on the intensity of bunches in synchrotrons // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2016. – Т. 13. – №. 7. – С. 829-832.

67) Zhabitsky V. M. Computerized Tomography of Ion Bunches at the Nuclotron // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2018. – Т. 15. – №. 7. – С. 767-773.

68) Torino L., Iriso U. Transverse beam profile reconstruction using synchrotron radiation interferometry // Physical review accelerators and Beams. – 2016. – Т. 19. – №. 12. – С. 122801.

69) J. Radon. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten // Berichte Sächsische Akademie der Wissenschaften, Bande 29, Leipzig, – 1917. – С. 262-277

70) Toft P. A., Sørensen J. A. The Radon transform-theory and implementation. – 1996.

71) Helgason S., Helgason S. The radon transform. – Boston : Birkhäuser, 1999. – Т. 2.

72) Deans S. R. The Radon transform and some of its applications. – Courier Corporation, 2007.

73) Лихачев А. В. Алгоритмы томографической реконструкции: учебное пособие, 2013 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://nsu.ru/xmlui/handle/nsu/863

74) Марусина М. Я., Казначеева А. О. Современные виды томографии. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 132 с.

75) Wang C. X. et al. Performance evaluation of filtered backprojection reconstruction and iterative reconstruction methods for PET images // Computers in biology and medicine. – 1998. – Т. 28. – №. 1. – С. 13-25.

76) Wang Z. et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE transactions on image processing. – 2004. – Т. 13. – №. 4. – С. 600-612.

77) Shi H. et al. A novel Iterative CT reconstruction approach based on FBP algorithm // PLoS one. – 2015. – Т. 10. – №. 9. – С. e0138498.

78) Chen C. C., Chu H. T. Similarity measurement between images // 29th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC'05). – IEEE, 2005. – Т. 2. – С. 41-42.

79) Wang L., Zhang Y., Feng J. On the Euclidean distance of images // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2005. – Т. 27. – №. 8. – С. 1334-1339.

80) Maurer C. R., Qi R., Raghavan V. A linear time algorithm for computing exact Euclidean distance transforms of binary images in arbitrary dimensions // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2003. – Т. 25. – №. 2. – С. 265-270.

81) Пакет прикладных программ MATLAB [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://uk.mathworks.com/products/matlab.html.

82) Двилис Э. С. Закономерности процессов консолидации порошковых систем при изменении условий деформации и физических воздействий: дис. – 2013.

83) Stuchebrov S. G., Miloichikova I. A., Batranin A. V., Danilova I. B., Krasnykh A. A., Kudrina V. A. Development of the method for the electron beam spatial distribution determination in the transverse plane // AIP Conference Proceedings. – 2016 – Vol. 1772, Article number 060016. – p. 1-7

84) Данилова И. Б., Красных А. А., Милойчикова И. А. Определение оптимального количества углов сканирования для измерения распределения плотности потока электронного пучка // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 т., Томск, 23-26 Апреля 2019. – Томск: ТПУ, 2019 – Т. 1. Физика – С. 124-126

85) Сечная Д. Ю., Красных А. А., Милойчикова И. А., Стучебров С. Г. Метод измерения распределения плотности потока электронов в поперечном сечении пучка на основе математической реконструкции // VII школа-конференция

молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Северск, 19-21 Октября 2016. – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2016 – С. 135

86) Miloichikova I. A., Bespalov V. I., Krasnykh A. A., Stuchebrov S. G., Cherepennikov Y. M., Dusaev R. R. Analysis of plane-parallel electron beam propagation in different media by numerical simulation methods // Russian Physics Journal. – 2018. – Т. 60. – №. 12. – С. 2115-2122.

87) Miloichikova I., Bulavskaya A., Cherepennikov Y., Gavrikov B., Gargioni E., Belousov D., Stuchebrov S. Feasibility of clinical electron beam formation using polymer materials produced by fused deposition modeling // Physica Medica. – 2019. – Т. 64. – С. 188-194.

88) Batranin A. V., Bondarenko S. L., Kazaryan M. A., Krasnykh A. A., Miloichikova I. A., Smirnov S. V., Cherepennikov Y. M Evaluation of the Effect of Moisture Content in the Wood Sample Structure on the Quality of Tomographic X-Ray Studies of Tree Rings of Stem Wood // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2019. – Т. 46. – №. 1. – С. 16-18.

89) Aleinik A. N., Aryshev A. S., Kalinin B. N. et al. Coherent Diffraction Radiation of a 6-MeV Microtron Electron Beam. // JETP Letters. – 2002. –Т. 76. – №. 6. – С. 337-340.

90) Standa [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.standa.lt/

91) 8MT175 – Motorized Linear Stages [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=60

92) GAFCHROMIC EBT2 self-developing film for radiotherapy dosimetry. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.veritastk.co.jp/attached/2062/GAFCHROMICEBT2 Technical-Brief-Rev1.pdf.

93) GAFCHROMIC DOSIMETRY MEDIA, TYPE EBT-3 [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.gafchromic.com/documents/EBT3_Specifications.pdf

94) Epson Perfection V750 Pro [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.epson.ru/catalog/scanners/epson-perfection-v750-pro/

95) Милойчикова И. А. Формирование дозных полей индивидуальной конфигурации клинических пучков электронов с помощью полимерных изделий, изготовленных посредством технологий трехмерной печати: дис. – 2018.

96) Diada [Электронный ресурс] Режим доступа: http://prodis-tech.ru/diada-software/

97) Управление рентгеновским томографом крупных объектов (INKCT): свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015615108 Российская Федерация / Чахлов С.В. № 2015615108; опубл. 20.06.2015. – 1 с.

98) Wu S. et al. 2013. Transverse beam profile diagnostic using fiber optic array. // Proceedings of PAC. – 2013. – С. 1205-1207.

99) Vukolov A. V. et al. 2016. Electron beam diagnostics tool based on Cherenkov radiation in optical fibers // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Т. 732 [012011] – С. 1-6.

100) Vukolov A. V. et al. Diagnostics of electron beams based on Cherenkov radiation in an optical fiber // Russian Physics Journal. – 2017. – Т. 59. – №. 10. – С. 1681-1685.

101) Seibel E. J. 2005. Medical imaging, diagnosis, and therapy using a scanning single optical fiber system: patent 6975898 USA.

102) Goettmann W., Körfer M., Wulf F. Beam profile measurement with optical fiber sensors at FLASH // Proc. of DIPAC. – TUPB, 2007. – Т. 25. – С. 123-125.

103) Pigtail SC/UPC, SM, 9/125, 0,9mm, G652D fiber, 1m [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.atel-electronics.eu/produkt.php?hash=08685#e2000_pigtails

104) Series G: transmission systems and media, digital systems and networks. Transmission media characteristics – Optical fibre cables [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.icsgroup.ru/upload/iconsult/299/G.652-200506.pdf

105) Клемин С. и др. Кремниевый фотоэлектронный умножитель // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – Т.8. – С. 80-86

106) J-Series High PDE and Timing Resolution, TSV Package [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://sensl.com/downloads/ds/DS-MicroJseries.pdf.

107) Спектрометрические устройства СУ-05П, СУ-05П1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.aspect-dubna.ru/new/page.php%3Fpage=431.html

108) Усилитель импульсный спектрометрический УИС-04 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.aspect-dubna.ru/new/page.php%3Fpage=309.html

109) Амплитудно-цифровой преобразователь БПА-04 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.aspect-dubna.ru/new/page.php%3Fpage=492.html

110) Управление системой измерения поперечного профиля пучка излучения (MeCroS): свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019610265 Российская Федерация / А.А. Красных, Ю.М. Черепенников, И.А. Милойчикова, С.Г. Стучебров. – № 2019610265; заявл. 25.12.18; опубл. 09.01.19. – 1 с.

111) 8MTF – Motorized XY Scanning Stage [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=311

112) Jelley J. V. Cherenkov radiation and its applications, Pergamon, London, U.K., 1958.

113) Беспалов В. И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом: учебное пособие – 4-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 369 с.

114) Saint-Gobain crystals BC-408, BC-412, BC-416 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.crystals.saint-gobain.com/products/bc-408-bc-412-bc-416

115) Shenzhen Amer Lighting Technology Co., Ltd. Manufacturer. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.eworldtrade.com/c/amerlighting/

116) ГОСТ 33366.1-2015 (ISO 1043-1:2011) Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Часть 1. Основные полимеры и их специальные характеристики. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.

117) 8MR190-2 – Motorized Rotation Stages [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=244

118) Красных А. А., Милойчикова И. А., Науменко Г. А., Черепенников Ю. М., Стучебров С. Г. Определение распределения плотности потока электронного пучка в поперечном сечении на основе многоуглового проволочного сканирования //Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. – 2018 – Т. 50 – №. 3. – С. 323-328

119) Stuchebrov S. G., Cherepennikov Y. M., Krasnykh A. A., Miloichikova I. A., Vukolov A. V. The method for the electron beam cross section measurement based on the detection of Cherenkov radiation in dielectric fiber // Journal of Instrumentation. – 2018 – Т. 13 – №. 5 – С. C05020.

120) Григорьева А. А., Красных А. А., Милойчикова И. А. Атоматизация метода проволочного сканирования пучков электронов // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию исследовательского ядерного реактора ТПУ, Томск, 21-22 Сентября 2017. – Томск: ТПУ, 2017 – С. 52-53

121) Stuchebrov S. G., Cherepennikov Y. M., Krasnykh A. A., Miloichikova I. A. The method for the electron beam cross section measurement based on Cherenkov radiation detection by multiangular scanning // Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures: Book of Abstracts of XII International Symposium, Hamburg, September 18-22, 2017. – Hamburg: DESY, 2017 – С. 154

122) Stuchebrov S. G., Cherepennikov Y. M., Krasnykh A. A., Miloichikova I. A., Shevelev M. V. Experimental and Theoretical Investigations of Generation and Transmission Mechanisms of Cherenkov Radiation in an Optical Fiber //Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena: Book of Abstracts of 8th International Conference, Naples, September 23-28, 2018. – Moscow: MEPhI, 2018 – С. 64

123) Stuchebrov S. G., Cherepennikov Y. M., Krasnykh A. A., Miloichikova I. A. Measurement of gamma radiation beam profile in the cross section by analyzing of Cherenkov radiation generated in the fiber during multi-angle scanning //Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena: Book of Abstracts of 8th International Conference, Naples, September 23-28, 2018. – Moscow: MEPhI, 2018 – С. 130

124) Bulavskaya A. A., Cherepennikov Yu. M., Grigorieva A. A., Miloichikova I. A., Startseva Z., Stuchebrov S. G., Velikaya V.Theoretical study of the dose measurements reliability with longitudinally arranged dosimetry films in materials with different densities / // Journal of Instrumentation. – 2020 – Vol. 15 – №. 3, Article number C03037.

125) Рентгеновский аппарат РАП 160-5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ncontrol.ru/catalog/rentgenovskiy_kontrol/rentgenovskie_apparaty/rentgenovskiy_apparat_rap_160_5

126) 8MT193-100 – Motorized Linear Stage [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=62

127) Рентгеновская трубка БСВ29 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://npo-proma.ru/katalog/techpribor/rentgenovskie-trubki/rentgenovskie-trubki-dlya-promyshlennosti/trubki-dlya-strukturnogo-analiza-s-massivnym-anodom/rentgenovskaya-trubka-bsv29/

128) Серия DXM модулей рентгеновских генераторов – корпорация Spellman High Voltage Electronics [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.spellmanhv.com/-/media/ru/Products/DXM.pdf?la=ru&hash=38206F39C87E3753073B21482B2DEC8D

129) Krasnykh A. A., Cherepennikov Y. M., Miloichikova I. A., Stuchebrov S. G. New approach to measure a flux density distribution in the beam cross section // From Basic Science and Applications to Technologies Inspired by Nature: Rarticipants' Abstracts of RACIRI 2018 Summer School, Hamburg, 25 August-1 September 2018. – Hamburg: DESY, 2018 – C. 39

130) Stuchebrov S. G., Bulavskaya (Krasnykh) A. A., Cherepennikov Y. M., Miloichikova I. A. Measurement of Wide-Aperture X-ray Beam Trasverse Profile Based on Multiangular Wire Scanning //Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures: Book of Abstracts of XIII International Symposium, Belgorod, September 15-20, 2019. – 2019 – C. 130

131) Bulavskaya (Krasnykh) A. A., Cherepennikov Y. M., Miloichikova I. A., Stuchebrov S. G. Determination of Wide-Aperture Electron and X-Ray Beams Transverse Sizes // Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures: Book of Abstracts of XIII International Symposium, Belgorod, September 15-20, 2019. – 2019 – C. 98

132) Cherepennikov Y. M., Bulavskaya (Krasnykh) A. A., Miloichikova I. A., Stuchebrov S. G. New Method to Measure Spatial Parameters of Radiation Beams //International conference on Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences: Book of Abstracts, Erevan, October 21-26, 2019. – Yerevan: Institute of Applied Problems of Physics, 2019 – C. 29

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Акт о внедрении результатов научных исследований

ООО «Элекард», 634055, г.Томск, пр.Академический, 10/3, Тел.: (3822)-578050, 592552elecard@inbox.ru

г.Томск «16» декабря 2016г.

АКТ

о внедрении результатов научных исследований аспирантки Национального исследовательского Томского политехнического университета Красных Ангелины Александровны в ООО «Элекард»

Разработанное Красных Ангелины Александровны программное обеспечение, позволяющее проводить математическую обработку массивов данных с целью реконструкции распределений интенсивностей в заданных сечениях распространения процессов, формирующих данные, передано в ООО «Элекард» в виде программного пакета «Data_reconstruction».

Внедрение результатов научных исследований Красных Ангелины Александровны, позволило оптимизировать обработку результатов измерений и ускорить процесс реконструкции массивов данных.

Директор ООО «Элекард» Грехов А.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019610265

Управление системой измерения поперечного профиля пучка излучения (MeCroS)

Правообладатель: ***федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)***

Авторы: ***Красных Ангелина Александровна (RU), Черепенников Юрий Михайлович (RU), Милойчикова Ирина Алексеевна (RU), Стучебров Сергей Геннадиевич (RU)***

Заявка № **2018664933**
Дата поступления **25 декабря 2018 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***09 января 2019 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев