

На правах рукописи



Булавская Ангелина Александровна

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

**01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной
физики**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Томск – 2020

Работа выполнена в Исследовательской школе физики высокоэнергетических процессов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

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

Официальные оппоненты: **Кубанкин Александр Сергеевич,**
Доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Белгородский государственный
национальный исследовательский университет» г.
Белгород, руководитель Международной научно-
образовательной лаборатории радиационной
физики

Эпп Владимир Яковлевич,
Доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Томский государственный
педагогический университет», профессор
кафедры теоретической физики

Защита состоится «24» декабря 2020 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, пр. Ленина, 43, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.01,
канд. т. наук



Мостовщиков А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Постоянное расширение области применения пучков ионизирующего излучения, а также развитие способов их генерации приводит к необходимости разработки новых методов для диагностики характеристик пучков. Развитие таких методов позволяет увеличивать точность определения параметров пучка, оптимизировать режимы работы ускорителя и получать востребованные и конкурентоспособные экспериментальные результаты фундаментальных исследований, а также решать прикладные задачи. Осуществлять контроль параметров пучков 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 [1]. Недостатком таких датчиков является их непрозрачность и недолговечность. Также используются вторично-эмиссионные детекторы, например, сетчатый датчик или детектор, основанный на проволочном сканировании [2]. 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 [3]. 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 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 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.

Цель и задачи работы

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

Основные положения, выносимые на защиту

1. Многоугольное 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 многоугольного сканирования на основе сцинтилляционного проволочного детектора при оптимальном количестве проекций 18 с разрешением не хуже 2×2 мм² 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.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, приведен краткий обзор литературы по проблеме, сформулированы цель работы, основные задачи, научная новизна, практическая значимость и основные защищаемые положения, описана структура 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 [4-6]. Рассмотрены исследования по использованию метода обратного преобразования Радона данных в области диагностики пучков ионизирующего излучения [7, 8].

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

Вторая глава диссертации посвящена разработке метода многоугольного сканирования для регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка, а также методов и методик, необходимых для его реализации.

В *разделе 2.1* обоснована концепция разрабатываемого в диссертационной работе метода многоугольного сканирования для регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка (рисунок 1).

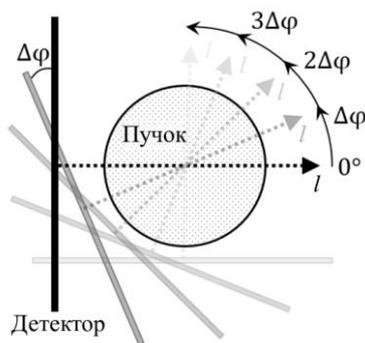


Рисунок 1 – Схема регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка методом многоугольного сканирования

Регистрация энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка осуществляется при помощи реконструкции зависимости интенсивности потока излучения от координат в измеряемой плоскости из зависимости интенсивности излучения, попавшего в детектор, от его

положения. Для получения таких зависимостей необходима экспериментальная установка, состоящая из детектирующего элемента и системы позиционирования. Детектирующий элемент должен позволять измерять интенсивность ионизирующего излучения, попавшего в его рабочее тело. Система позиционирования должна перемещать детектирующий элемент в направлении оси l (см. рисунок 1) поступательно в измеряемой плоскости, которая перпендикулярна оси распространения пучка. Таким образом, при одном полном поступательном смещении детектирующего элемента регистрируется зависимость интенсивности излучения, попавшего в рабочую область детектора, от его положения вдоль оси l . После этого угол сканирования φ меняется на заданное значение $\Delta\varphi$ и измерение повторяется. Центр вращения детектирующего элемента должен совпадать с осью распространения пучка. Для корректной реконструкции данных полный угол смещения должен быть не меньше 180° , таким образом, количество проекций n определяется отношением полного угла смещения к смещению угла сканирования $\Delta\varphi$. При помощи математической реконструкции методом обратного преобразования Радона из набора таких данных (проекций) рассчитывается энергетическое распределение ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

В разделе 2.2 приводятся основные принципы проведения математической реконструкции на основе обратного преобразования Радона для двумерного случая. Преобразования Радона для случая двумерного пространства позволяют определить интеграл от функции $g(x, y)$ вдоль прямой АВ, перпендикулярной $\vec{n} = (\cos\varphi, \sin\varphi)$, и проходящей на расстоянии l от начала координат по формуле:

$$f(l, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\sqrt{l^2 + p^2}, \varphi + \arctan(p/l)) dp, \quad (1)$$

где φ – угол между положительным направлением оси X и вектором \vec{n} , p – отрезок прямой АВ.

При этом функция $g(x, y)$ должна быть определена на плоскости и несобственный интеграл такой функции должен быть сходящимся. Рисунок 2 представлен к пояснению формулы (1).

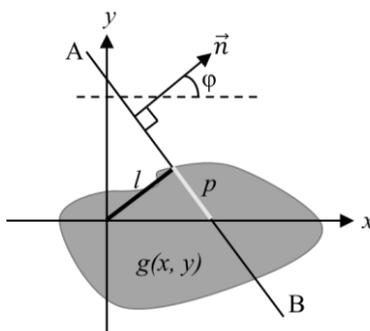


Рисунок 2 – К пояснению формулы преобразования Радона (1)

Формула (1) является одной из основных для двумерной томографии. Она может быть интерпретирована следующим образом. Каждая одномерная проекция фильтруется посредством фильтра высоких частот, который в Фурье-пространстве представляется умножением на модуль частоты. Вслед за этим проводится интегрирование по вектору направлений – обратное проецирование. Данный метод будет использоваться далее в диссертационной работе для преобразования измеряемых проекционных данных в распределение интенсивности ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка.

Для количественной оценки качества реконструированных изображений использовался общепринятый критерий – среднеквадратическое отклонение (СКО) интенсивности восстановленного изображения от контрольного, которое было представлено в дискретной форме [9]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i,j} (f_{rec}(x_i, y_j) - f(x_i, y_j))^2}, \quad (2)$$

где M и N – горизонтальный и вертикальный размеры изображений в пикселях, $f_{rec}(x_i, y_j)$ – значение интенсивности реконструированного изображения в точке (x_i, y_j) , $f(x_i, y_j)$ – значение интенсивности контрольного изображения в точке (x_i, y_j) . Нормированное среднеквадратичное отклонение при абсолютном совпадении изображений равно 0, при абсолютном несовпадении – 1. В расчетах в качестве контрольного изображения использовалось исходное распределение, в экспериментах – распределения, полученные с помощью широко применяемых на практике пленочных дозиметров.

Также для сравнения полученных результатов использовался общепринятый критерий для сравнения изображений – евклидово расстояние [10], 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:

$$\delta = \sqrt{\sum_k (m_k - e_k)^2}, \quad (3)$$

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.

В разделе 2.3 проведена оценка зависимости качества реконструированного изображения от количества сканирований и определено оптимальное количество проекций. Для этого с помощью программного пакета MatLab было построено двумерное изображение, после чего по аналогии с разрабатываемым методом получены его проекции под разными углами. С использованием разного количества проекций были реконструированы тестовые изображения и проведены их сравнения с оригиналом.

Было выбрано сложное гауссово распределение с несколькими максимумами и минимумами в связи с тем, что данное распределение характерно для пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка. Из исходного изображения были получены двумерные проекции, таким образом, что значение в каждой точке составляет сумму интенсивностей цветов в градации серого в столбце, перпендикулярном

направлению сканирования (l), угол с осью ОХ которого является углом смещения ($\Delta\varphi$) и задается в соответствии с необходимым количеством проекций (n) с учетом того, что полный угол смещения должен быть равен 180° .

На рисунке 3 представлены некоторые результаты реконструкции оригинального изображения распределения с несколькими максимумами и минимумами, полученные при разных количествах проекций.

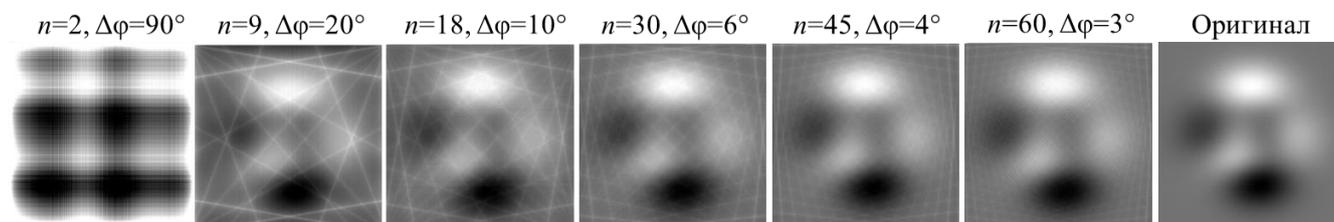


Рисунок 3 – Результаты реконструкции распределения с несколькими максимумами и минимумами при разных количествах проекций n , полученных с угловым шагом $\Delta\varphi$

Все полученные изображения были представлены в виде матриц интенсивностей с одинаковым количеством пикселей, после чего по формулам (2) и (3) были рассчитаны критерии качества реконструированных распределений от количества проекций (n) (рисунок 4).

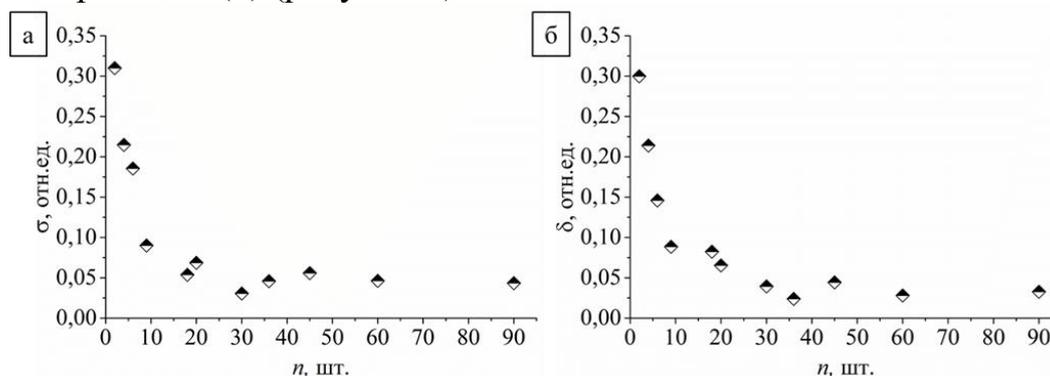


Рисунок 4 – Графики зависимости критериев качества реконструированных распределений от количества проекций: а – среднеквадратического отклонения, б – евклидова расстояния

Полученные результаты (рисунок 4) согласуются между собой, так как значения σ и δ в каждой точке отличаются не более чем на 3%. Таким образом, для количественной оценки результатов, полученных методом многоугольного сканирования для регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка может использоваться как среднеквадратическое отклонение (формула (2)), так и евклидово расстояние (формула (3)).

Для реализации метода многоугольного сканирования пучка необходимо определить оптимальное количество проекций ($n_{\text{опт}}$). В данном случае оптимальным количеством является такое значение, при котором результат реконструкции всё еще достоверный при минимальном количестве времени, затраченном на проведение измерения. Данное определение можно описать математически следующим образом: $n_{\text{опт}}$ – это точка, в которой скорость возрастания функции совпадения изображений от n равна скорости возрастания функции времени от n .

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

$$t(n) = a \cdot n + d. \quad (4)$$

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:

$$\Delta(n) = b \cdot n^c, \quad (5)$$

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:

$$f(n) = 1 - \Delta(n) = 1 - b \cdot n^c. \quad (6)$$

Для определения $n_{\text{опт}}$ необходимо вычесть (6) из (4) и найти максимум полученной функции:

$$(f(n) - t(n))' = -b \cdot c \cdot n^{c-1} - a = 0, \\ n_{\text{опт}} = \sqrt[c-1]{-\frac{a}{b \cdot c}}. \quad (7)$$

Для нахождения $n_{\text{опт}}$ по формуле (7) 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 многоугольного сканирования количество проекций всегда было больше 10.

Полученное выражение для поиска $n_{\text{опт}}$ (формула (7)) в дальнейшем будет применяться для практической реализации метода многоугольного сканирования на конкретной установке.

Третья глава описывает процесс разработки и испытания экспериментальных установок для регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка методом многоугольного сканирования.

В разделе 3.1 представлены результаты регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении пучка Микротрона ТПУ с энергией электронов 6,1 МэВ с помощью разработанного металлического сканирующего элемента. 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 сканирующей рамки, таким образом, сигнал на цилиндре Фарадея менялся в зависимости от положения сканирующего элемента.

Металлический сканирующий элемент представлял собой прямоугольную алюминиевую раму толщиной 10 мм, с семью плоскими полосками шириной 1 мм, расположенными относительно друг друга под разными углами с шагом 9°. Сканирующий элемент был изготовлен из алюминиевого листа с помощью координатного фрезерного станка. При движении сканирующего элемента пучок

последовательно перекрывался пластинами, ориентированными под углами -27° , -18° , -9° , 0° , $+9^\circ$, $+18^\circ$, $+27^\circ$ по отношению к вертикали. В следующих сканированиях ориентация и направление движения элемента изменялось на $\pm 63^\circ$, что позволило получить 21 зависимость тока пучка от положения сканирующей пластины, ориентированной под углами от -90° до $+90^\circ$ с шагом 9° .

Для оценки результатов проводились дополнительные измерения с помощью дозиметрических пленок. Было проведено два измерения поперечного распределения интенсивности электронов: коллимированного пучка без мишени и коллимированного пучка с мишенью. Характерный размер пучка равен 20 мм.

На рисунке 5 представлены энергетические распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении коллимированного пучка без мишени (а, б) и коллимированного пучка с мишенью (в, г), полученные дозиметрическими пленками (а, в) и сканирующим устройством после реконструкции (б, г). Пунктирными линиями на рисунке 5 обозначены характерные размеры пучка.

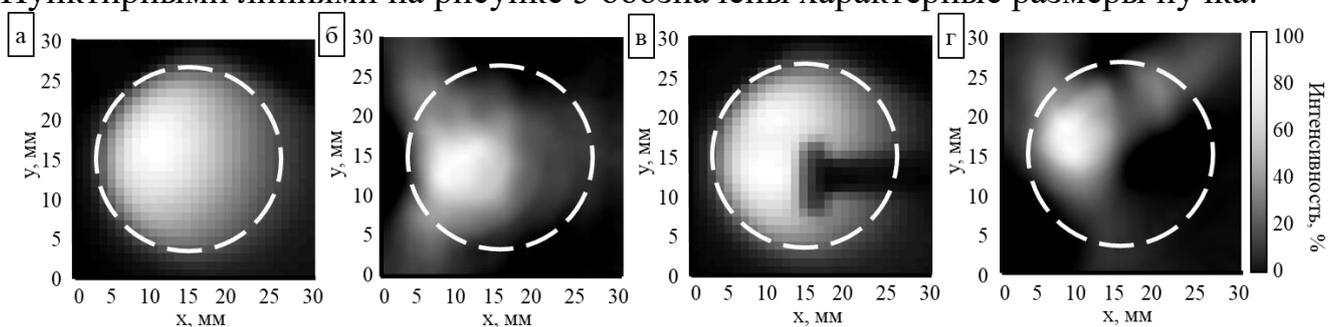


Рисунок 5 – Результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка: а – без мишени, пленка; б – без мишени, сканирующее устройство; в – с мишенью, пленка; г – с мишенью, сканирующее устройство

Полученные результаты в эксперименте без мишени (рисунки 5а и 5б) показывают, что метод многоуглового сканирования позволяет с точностью до 2 мм определить положение электронного пучка, однако, значения интенсивности излучения в точке, зарегистрированные предложенным методом, могут отличаться на 25%, что обуславливает величины σ и δ равных 0,365 и 0,386 соответственно. Результаты эксперимента с мишенью (рисунки 5в и 5г) показали, что с увеличением «сложности» пучка, уменьшается качество реконструкции ($\sigma=0,461$ и $\delta=0,474$). Видно, что результаты реконструкции позволяют лишь приблизительно оценить размер и положение пучка, однако, качество полученных реконструкций недостаточно высокое.

В разделе 3.2 предложено использовать детектор на основе оптоволоконного кабеля (фибер), в теле которого под действием высокоэнергетических заряженных частиц генерируется излучение Вавилова-Черенкова. Исследование возможности регистрации энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка с помощью излучения Вавилова-Черенкова проводилось с помощью ускорителя – микротрон МИ-6 ТПУ. 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. В качестве детектирующего элемента в эксперименте использовался оптоволоконный кабель, который относится к оптоволокну типа G.652.D. Диаметр сечения рабочей области детектора (оптоволоконный материал) составлял 0,09 мм. Под действием

высокоэнергетических электронов в оптоволокне генерировалось вторичное излучение. Часть оптоволокна, не участвовавшая в сканировании, а служившая для передачи света, экранировалась свинцом для исключения попадания электронов в фибер вне рабочей области. Свет по оптическому каналу поступал на фотодетектор. Экспериментальные данные набирались при построчном торцевом сканировании пучка оптоволокном. В экспериментах использовался кремниевый ФЭУ MicroSB/FB фирмы SensL, который имел активную область $6 \times 6 \text{ мм}^2$, 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.

На первом этапе было принято решение проводить регистрацию энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка при торцевой геометрии детектора путем построчного сканирования.

Для оценки результатов также были проведены результаты регистрации энергетических распределений электронов в поперечном сечении пучка с помощью дозиметрических пленок. Было проведено два эксперимента: на коллимированном пучке без мишени и на коллимированном пучке с мишенью. Результаты экспериментов, полученные с помощью дозиметрических пленок и оптоволоконного кабеля, представлены на рисунке 6. Пунктирными линиями на рисунке 6 обозначена форма пучка.

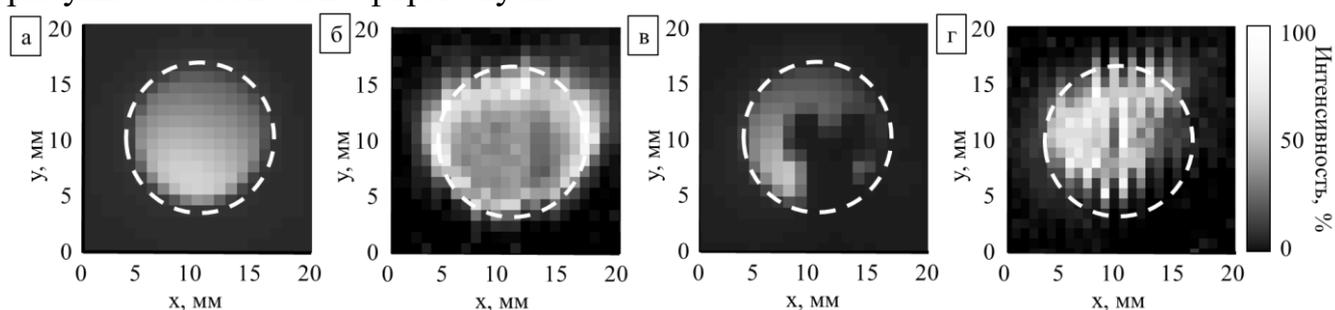


Рисунок 6 – Результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка: а – без мишени, пленка; б – без мишени, фибер; в – с мишенью, пленка; г – с мишенью, фибер

Результаты эксперимента на коллимированном пучке (рисунки ба и бб) показывают возможность определения размеров пучка с помощью фибера с точностью 3 мм, однако, значения интенсивности излучения в точке практически не совпадают, что обуславливает высокие значения σ и δ равных 0,432 и 0,446 соответственно. Значения интенсивности излучения в эксперименте с мишенью может отличаться от истинного на 60%, положение и размеры пучка практически не определяются (рисунки бв и бг), значения σ и δ в данном эксперименте составили 0,429 и 0,411 соответственно. Разница полученных результатов обусловлена зависимостью эффективности генерации и распространения в световоде фотонов от угла влета электрона в рабочую область детектора. Так как применяемый в эксперименте электронный пучок расходящийся, угол влета электрона в фибер изменялся в зависимости от положения детектирующего элемента.

Далее в разделе были получены результаты регистрации профиля пучка в геометрии при перпендикулярном расположении фибера относительно оси распространения пучка. В результате измерения не было обнаружено корреляции получаемых данных с положением пучка и все полученные значения находились в

пределах фоновых. Таким образом, было принято решение использовать сцинтилляционный материал в качестве рабочего тела детектора, в котором под действием ионизирующего излучения возникают световые фотоны, генерация и распространение которых не так сильно зависит от ориентации в пространстве, как у оптоволоконного материала.

В *разделе 3.3* описана работа по созданию и применению новой экспериментальной установки, для чего было принято решение изготовить сцинтилляционный детектирующий элемент, в теле которого под действием ионизирующего излучения генерируются сцинтилляционные фотоны, интенсивность которых пропорциональна интенсивности первичного излучения. В эксперименте в качестве источника излучения использовался Микротрон ТПУ. После выходного окна электронный пучок проходил через коллиматор круглой формы с диаметром $d = 10$ мм и толщиной $z = 50$ мм. Определение распределения интенсивности электронного пучка в поперечном сечении проводилось на расстоянии $a = 50$ мм от коллиматора. Первый эксперимент проводился на пучке без мишени, а второй – на пучке с мишенью.

Сканирующее устройство представляло собой сцинтилляционную полосу с размерами $2 \times 6 \times 150$ мм³, которая была изготовлена вручную из сцинтиллятора ВС-408 фирмы Saint-Gobain. Генерирующиеся в сцинтилляторе световые фотоны передавались по оптоволоконному кабелю в кремниевый фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), с которого электронный сигнал передавался на спектрометрическое устройство (СУ). Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунке 7, на рисунке 8 показана геометрия эксперимента.

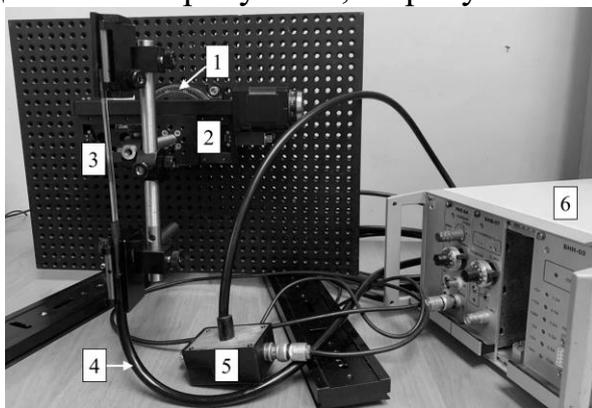


Рисунок 7 – Внешний вид экспериментальной установки: 1 – поворотная платформа; 2 – линейный транслятор; 3 – сцинтиллятор; 4 – фибер; 5 – ФЭУ; 6 – СУ

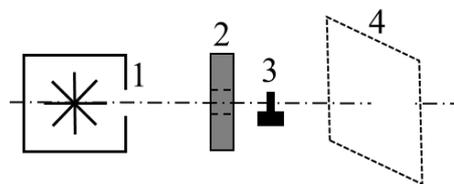


Рисунок 8 – Геометрия эксперимента: 1 – источник ионизирующего излучения, 2 – коллиматор, 3 – мишень, 4 – плоскость детектирования

В эксперименте движение детектирующей полоски 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.

На рисунке 9 представлены результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка без мишени и пучка с мишенью, полученные с помощью дозиметрической пленки и предлагаемого метода. Пунктирными линиями на рисунке 9 обозначена форма пучка.

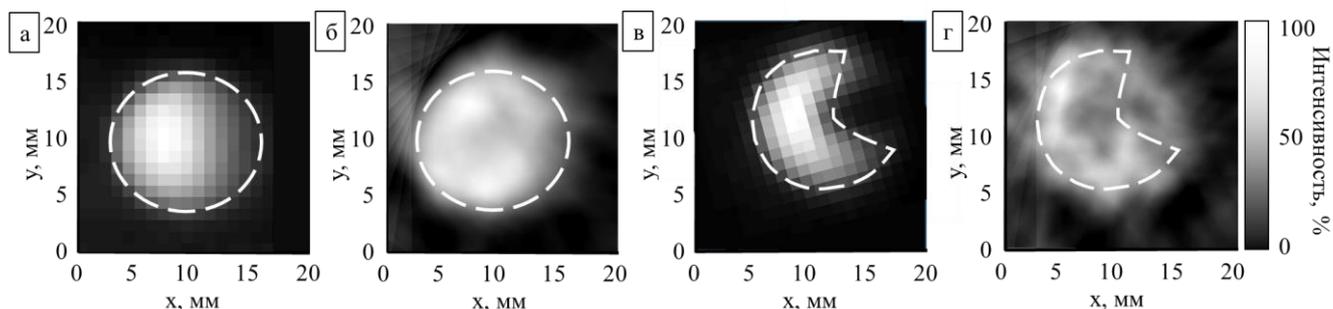


Рисунок 9 – Результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка: а – без мишени, пленка; б – без мишени, сцинтилляционный детектор; в – с мишенью, пленка; г – с мишенью, сцинтилляционный детектор

Из рисунков 9а и 9б 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 детектирующей полоски равной 2 мм, 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 Вавилова-Черенкова в объеме оптоволокну, световод был экранирован свинцовой фольгой, однако, в области соединения сцинтиллятора и оптоволокну его экранирование не представлялось возможным. В связи с этим, при некоторых положениях детектора, в световоде могли генерироваться черенковские фотоны, за счет этого на рисунке 9б границы пучка размыты.

На рисунке 9г наглядно видно горячее пятно, однако, качество 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 9г не полное отсутствие интенсивности, а спад интенсивности в области расположения мишени (около 40%). Все выше описанные факторы влияют на результаты измерения, что обуславливает значения σ и δ равные 0,371 и 0,359 соответственно для коллимированного пучка без мишени и 0,427 и 0,448 соответственно для коллимированного пучка с мишенью.

Для оценки полученных распределений, 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 10 представлены результаты, полученные после обработки. Пунктирными линиями на рисунке 10 обозначена форма пучка.

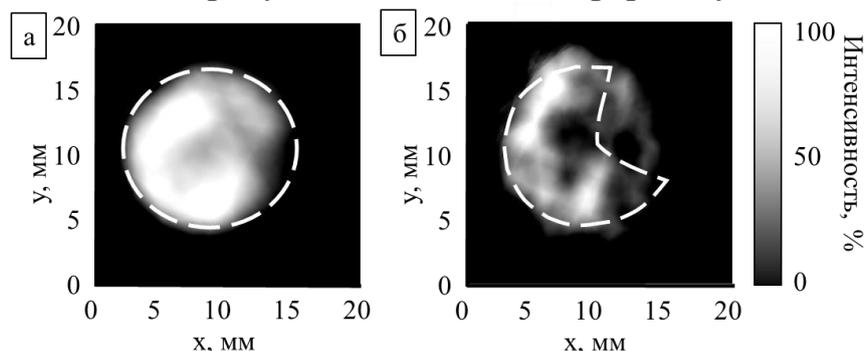


Рисунок 10 – Перенормированные результаты определения распределения интенсивности электронов в поперечном сечении пучка: а – без мишени; б – с мишенью

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.

Полученные результаты после корректировки данных экспериментов без мишени и с мишенью (рисунок 10) показывают, что с помощью сцинтилляционного детектирующего элемента можно проводить измерения размеров пучка и определять его положение с точностью до 2 мм, что сопоставимо с разрешением детектора и шагом сканирования, однако, значения интенсивности излучения, измеренные предложенным методом, отличаются, что обуславливает высокие значения δ полученных результатов. Несмотря на заметные различия в результатах, рисунки 9 и 10 демонстрируют возможность наглядной оценки энергетических распределений электронов в поперечном сечении пучка и размеров электронных пучков при помощи созданной экспериментальной установки.

В *разделе 3.4* было проведено сравнение критериев оценки результатов, полученных с помощью всех разработанных экспериментальных установок (таблица 1).

Таблица 1 – Значения количественных оценок качества результатов, полученных с помощью всех разработанных экспериментальных установок

Детектирующий элемент	$\sigma_{\text{коллим}}$	$\delta_{\text{коллим}}$	$\sigma_{\text{мишень}}$	$\delta_{\text{мишень}}$
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 $\sigma_{\text{коллим}}$ и $\delta_{\text{коллим}}$ – значения выбранных критериев, полученных в экспериментах на коллимированном пучке без мишени, $\sigma_{\text{мишень}}$ и $\delta_{\text{мишень}}$ – значения выбранных критериев для экспериментов на коллимированном пучке с мишенью.

По результатам, приведенным в таблице 1, видно, что постобработка полученных изображений может существенно улучшить результат. В заключении раздела было принято решение в дальнейшей работе для применения метода многоугольного сканирования использовать экспериментальную установку на основе сцинтилляционного элемента.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям по применению метода многоугольного сканирования с помощью экспериментальной установки, основанной на применении сцинтилляционного элемента, внешний вид которой представлен на рисунке 7. Для оценки работоспособности метода было принято решение использовать «стабильные» пучки. В данной работе пучок считался «стабильным», если интенсивность ионизирующего излучения меняется за время проведения измерения не более чем на 5%. Стабильность пучков определялась путем сравнения результатов многократных измерений мгновенных значений мощности дозы с помощью дозиметра PTW-UNIDOS. 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 определить даже с учетом множества факторов, оказывающих негативный эффект на результат регистрации.

В каждом эксперименте данной главы менялись следующие параметры: расстояние от края коллиматора до плоскости измерения (a), расстояние поступательного смещения детектирующего элемента (l), угловой шаг сканирования ($\Delta\varphi$), время измерения интенсивности излучения в точке (t_i).

Разрешение (r) результатов, полученных с помощью пленочных дозиметров, определяется размером пикселя изображения, а разрешение результатов, полученных методом многоугольного сканирования, – шагом детектора.

В *разделе 4.1* излагаются результаты экспериментов по регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении импульсного рентгеновского пучка. В качестве источника излучения был выбран рентгеновский аппарат РАП 160-5. Параметры рентгеновского пучка в эксперименте составили: анодный ток – 1 мА, анодное напряжение – 130 кВ.

Геометрия эксперимента была аналогична геометрии, представленной на рисунке 8. При проведении эксперимента были выбраны следующие параметры: $a = 50$ мм, $l = 40$ мм, $\Delta\varphi = 4^\circ$, $t_i = 10$ с. Характерный размер пучка равен 20 мм. Коллимированный пучок частично экранировался мишенью сложной формы.

На рисунке 11 представлены энергетические распределения импульсного рентгеновского пучка, полученные с помощью пленочного дозиметра и методом многоугольного сканирования.

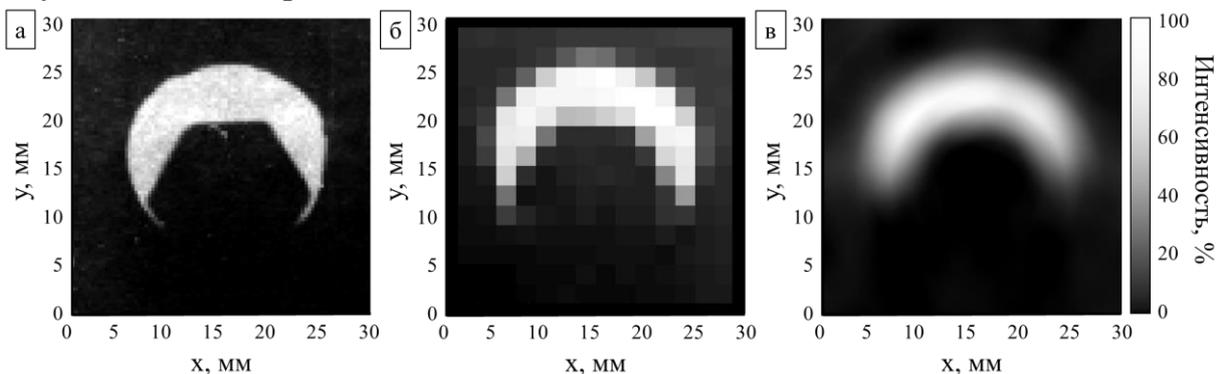


Рисунок 11 – Результаты регистрации распределения интенсивности излучения в поперечном сечении импульсного рентгеновского пучка с помощью:

а – пленки, $r = 0,5$ мм; б – пленки, $r = 2$ мм; в – метода многоугольного сканирования, $r = 2$ мм

При сравнении полученных значений $\sigma=0,164$ и $\delta=0,165$ (рисунки 11а и 11в) со значениями, полученными ранее (таблица 1), видно, что качество полученного результата значительно выше среднего для пучка с мишенью, что позволяет говорить об эффективном применении предложенного метода.

По рисунку 11 видно, что размеры пучка совпадают с точностью не более 2 мм. Однако, распределения интенсивности излучения в поперечном сечении пучка, полученные методом многоугольного сканирования (рисунки 11в), имеют существенно меньшую контрастность, в то время как распределения, полученные с помощью пленочного дозиметра (рисунки 11а), спадают резко. Разрешение экспериментальной установки, основанной на сцинтилляторе равно 2 мм и определяется толщиной детектирующего элемента. При сравнении результатов, полученных с помощью предложенного метода (рисунки 11в) и пленочного дозиметра при таком же разрешении (рисунки 11б) видно, что качество результатов, полученных методом многоугольного сканирования, несколько 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 $n_{\text{опт}}$ осуществлялся по выведенной ранее формуле (7). Таким образом, были получены реконструкции распределения интенсивности излучения в поперечном сечении импульсного рентгеновского пучка при количестве проекций 45, 22, 11, 5 и найдены по формулам (2) и (3) 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 $n_{\text{опт}}$. Таким образом, оптимальное количество проекций для получения достоверных результатов с помощью экспериментальной установки с сцинтилляционным детектором равно 18 ($\Delta\varphi=10^\circ$).

В разделе 4.2 описывается эксперимент по применению метода многоугольного сканирования, в котором в качестве источника излучения был выбран бетатрон с выведенным электронным пучком, предназначенный для медицинских целей. Средняя энергия выведенных электронов в эксперименте составила 4 МэВ.

Геометрия эксперимента была аналогична геометрии, представленной на рисунке 8. При проведении эксперимента были выбраны следующие параметры: $a = 30$ мм, $l = 50$ мм, $\Delta\varphi = 10^\circ$, $t_i = 2$ с. Характерный размер пучка равен 40 мм.

Как и в предыдущем эксперименте (раздел 4.1) проводилась регистрация пучка сложной формы, поэтому на его пути была установлена металлическая мишень, частично экранирующая пучок. На рисунке 12 представлены энергетические распределения электронного пучка сложной формы, полученные с помощью пленочного дозиметра и методом многоугольного сканирования.

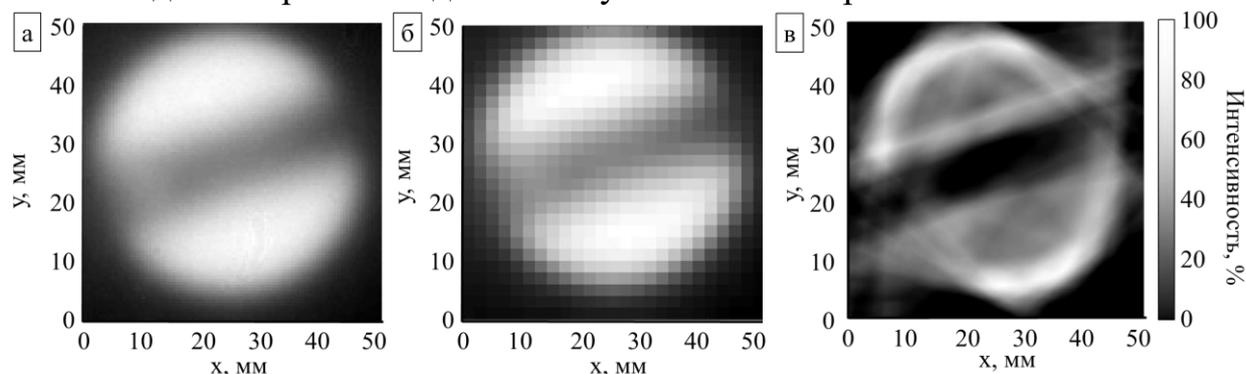


Рисунок 12 – Результаты регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка, полученные с помощью: а – пленки, $r = 0,5$ мм; б – пленки, $r = 2$ мм; в – метода многоугольного сканирования, $r = 2$ мм

Из рисунка 12 видно, что метод пригоден для регистрации энергетического распределения электронов в поперечном сечении пучка ($\sigma=0,264$ и $\delta=0,266$ для рисунков 12а и 12в). Размер пучка определялся с точностью до 2 мм, что обуславливается шагом сканирования. Однако, полученная методом многоугольного сканирования интенсивность в центральной области пучка меньше чем на его краях. 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 области мишени по сравнению с результатами, полученными с помощью пленочного дозиметра.

В *разделе 4.3* приведены результаты регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении рентгеновского пучка постоянного действия. При этом на пути пучка была установлена мишень, изготовленная из нескольких алюминиевых фольг таким образом, чтобы обеспечить наличие четырех областей поглощения с толщинами алюминия: 0; 0,1; 0,2 и 0,3 мм. В эксперименте использовался источник рентгеновского излучения, состоящий из рентгеновской трубки БСВ29 и модуля рентгеновского генератора DXM60 фирмы Spellman. Источник рентгеновского излучения оснащен системой водного охлаждения, что позволяет выводить стабильный пучок в течении длительного времени. Параметры рентгеновского пучка в эксперименте составили: анодный ток – 10 мА, анодное напряжение – 60 кВ. Толщина половинного ослабления алюминием при таких параметрах равна 0,2 мм.

Геометрия эксперимента была аналогична геометрии, представленной на рисунке 8. При проведении эксперимента были выбраны следующие параметры: $a = 40$ мм, $l = 40$ мм, $\Delta\varphi = 10^\circ$, $t_i = 10$ с. Характерный размер пучка равен 20 мм.

На рисунке 13 представлены энергетические распределения рентгеновского пучка постоянного действия, полученные с помощью пленочного дозиметра и методом многоуглового сканирования.

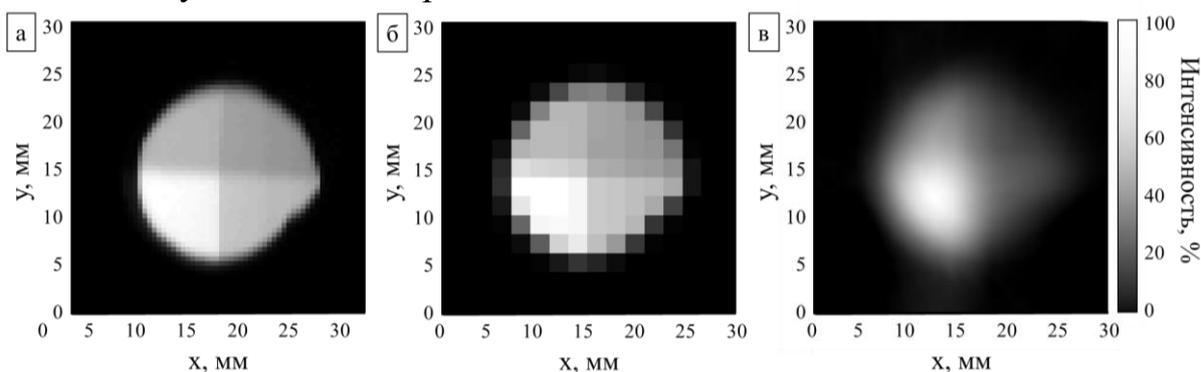


Рисунок 13 – Результаты регистрации энергетического распределения излучения в поперечном сечении рентгеновского пучка постоянного действия с помощью:

а – пленки, $r = 0,5$ мм; б – пленки, $r = 2$ мм; в – метода многоуглового сканирования, $r = 2$ мм

При сравнении полученных $\sigma=0,164$ и $\delta=0,165$ (рисунки 13а и 13в) со значениями, полученными ранее (разделы 4.1 и 4.2, таблица 1), видно, что качество полученного результата значительно выше среднего, что позволяет говорить о работоспособности предложенного метода по определению распределения интенсивности излучения в поперечном сечении пучка.

На рисунке 13 видно, что полученные результаты позволяют определить форму и размеры рентгеновского пучка постоянного действия. По рисунку 13в можно получить размер рентгеновского пучка с точностью до 2 мм, что обусловлено разрешением экспериментальной установки. На рисунке 13в явно просматриваются горячие и холодные пятна, при этом низкий контраст на краях пучка и на границах различных частей мишени обусловлены разрешением детектора. При этом результат, полученный методом многоуглового сканирования

(рисунок 13в) визуально значительно информативнее результата, полученного с помощью дозиметрической пленки с разрешением 2 мм (рисунок 13б).

Результаты, представленные на рисунках 11 – 13 показывают, что метод многоугольного сканирования позволяет измерить распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка с разрешением 2 мм.

В заключении излагаются основные выводы по результатам диссертации:

1. Обратное преобразование Радона позволят реализовать и эффективно применить метод многоугольного 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 2×2 мм².

В заключении диссертации приводятся практические рекомендации для эффективного применения метода многоугольного сканирования: для получения достоверных результатов по полученному в работе выражению (7) можно определить оптимальное количество проекций для реализации метода многоугольного 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 используемых сканирующих детекторов в ускорительных установках, что позволит при минимальных доработках регистрировать не только профиль пучка, но и его пространственное энергетическое распределение.

В приложениях 1 и 2 представлены копии полученных при выполнении работы акта о внедрении результатов научных исследований и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Список публикаций по теме диссертации

1. **Krasnykh, A. A.** Analysis of Plane-Parallel Electron Beam Propagation in Different Media by Numerical Simulation Methods / I. A. Miloichikova, V. I. Beshpalov, A. A. Krasnykh, S. G. Stuchebrov, Y. M. Cherepennikov, R. R. Dusaev // Russian Physics Journal. – 2018 – Vol. 60 – №. 12. – P. 2115-2122.
2. **Красных, А. А.** Определение распределения плотности потока электронного пучка в поперечной плоскости на основе многоугольного проволочного сканирования / А.А. Красных, И. А. Милойчикова, Г. А. Науменко, Ю. М. Черепенников, С. Г. Стучебров // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. – 2018 – Т. 50 – №. 3. – С. 323-328.
3. **Krasnykh, A. A.** The method for the electron beam cross section measurement based on the detection of Cherenkov radiation in dielectric fiber / A. A. Krasnykh, S. G. Stuchebrov, Y. M. Cherepennikov, I. A. Miloichikova, A. V. Vukolov // Journal of Instrumentation. – 2018 – Vol. 13 – №. 5, Article number C05020.
4. **Bulavskaya, A. A.** Feasibility of clinical electron beam formation using polymer materials produced by fused deposition modeling / I. A. Miloichikova, A. A. Bulavskaya, Y. M. Cherepennikov, B. M. Gavrikov, E. Gargioni, D. A. Belousov, S. G. Stuchebrov // Physica Medica. – 2019 – Vol. 64. – P. 188-194.
5. **Bulavskaya, A. A.** 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 / A. V. Batranin, S. L. Bondarenko, M. A. Kazaryan, A. A. Krasnykh, I. A. Miloichikova, S. V. Smirnov, S. G. Stuchebrov, Y. M. Cherepennikov // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2019 – Vol. 46 – №. 1. – P. 16-18.
6. **Bulavskaya, A. A.** Theoretical study of the dose measurements reliability with longitudinally arranged dosimetry films in materials with different densities / A. A. Bulavskaya, Yu. M. Cherepennikov, A. A. Grigorieva, I. A. Miloichikova, Z. Startseva, S. G. Stuchebrov, V. Velikaya // Journal of Instrumentation. – 2020 – Vol. 15 – №. 3, Article number C03037.
7. **Krasnykh, A. A.** Development of the method for the electron beam spatial distribution determination in the transverse plane / S. G. Stuchebrov, I. A. Miloichikova, A. V. Batranin, I. B. Danilova, A. A. Krasnykh, V. A. Kudrina // AIP Conference Proceedings. – 2016 – Vol. 1772, Article number 060016.
8. **Красных, А. А.** Определение оптимального количества углов сканирования для измерения распределения плотности потока электронного пучка / И. Б. Данилова, А. А. Красных, И. А. Милойчикова // 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.
9. **Krasnykh, A. A.** The method for the electron beam cross section measurement based on Cherenkov radiation detection by multiangular scanning / S. G. Stuchebrov, Y. M. Cherepennikov, A. A. Krasnykh, I. A. Miloichikova // Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures: Book of Abstracts of XII International Symposium, Hamburg, September 18-22, 2017. – Hamburg: DESY, 2017 – P. 154.
10. **Krasnykh, A. A.** Measurement of gamma radiation beam profile in the cross section by analyzing of Cherenkov radiation generated in the fiber during multi-angle

- scanning / S. G. Stuchebrov, Y. M. Cherepennikov, A. A. Krasnykh, I. A. Miloichikova // Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena: Book of Abstracts of 8th International Conference, Naples, September 23-28, 2018. – Moscow: MEPhI, 2018 – P. 130.
11. **Krasnykh, A. A.** New approach to measure a flux density distribution in the beam cross section / A. A. Krasnykh, Y. M. Cherepennikov, I. A. Miloichikova, S. G. Stuchebrov // From Basic Science and Applications to Technologies Inspired by Nature: Participants' Abstracts of RACIRI 2018 Summer School, Hamburg, 25 August-1 September 2018. – Hamburg: DESY, 2018 – P. 39.
 12. **Bulavskaya, A. A.** Measurement of wide-aperture X-ray beam transverse profile based on multiangular wire scanning / S. G. Stuchebrov, A. A. Bulavskaya, Y. M. Cherepennikov, I. A. Miloichikova // Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures: Book of Abstracts of XIII International Symposium, Belgorod, September 15-20, 2019. – 2019 – P. 130.
 13. **Bulavskaya, A. A.** New method to measure spatial parameters of radiation beams / Y. M. Cherepennikov, A. A. Bulavskaya, I. A. Miloichikova, S. G. Stuchebrov // 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 – P. 29.

Цитированная литература

1. Michail C. et al. Measurement of the luminescence properties of Gd₂O₂S: Pr, Ce, F powder scintillators under X-ray radiation //Radiation Measurements. – 2014. – Vol. 70. – P. 59-64.
2. Cheymol B. Development of beam transverse prole and emittance monitors for the CERN LINAC4. – 2011. – №. CERN-THESIS-2011-289.
3. Weilbach T. et al. Optical electron beam diagnostics for relativistic electron cooling devices //COOL. – 2011. – Vol. 11. – P. 121.
4. Dai W. et al. Design study of an improved laser wire system for electron beam measurement //Chinese Physics C. – 2013. – Vol. 37. – №. 10. – P. 108101.
5. 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. – Vol. 13. – №. 12. – P. P12012.
6. Burke E. et al. The practical application of scintillation dosimetry in small-field photon-beam radiotherapy //Zeitschrift für Medizinische Physik. – 2017. – Vol. 27. – №. 4. – P. 324-333.
7. Zhabitsky V. M. Computerized tomography of ion bunches at the nuclotron //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2018. – Vol. 15. – №. 7. – P. 767-773.
8. Torino L., Iriso U. Transverse beam profile reconstruction using synchrotron radiation interferometry //Physical review accelerators and Beams. – 2016. – Vol. 19. – №. 12. – P. 122801.
9. Shi H. et al. A novel Iterative CT reconstruction approach based on FBP algorithm // PLoS one. – 2015. – Vol. 10. – №. 9. – P. e0138498.
10. Chen C. C., Chu H. T. Similarity measurement between images //29th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC'05). – IEEE, 2005. – Vol. 2. – P. 41-42.