

На правах рукописи



**Вагнер Александр Рудольфович**  
**Монохроматизация пучков рентгеновского**  
**излучения электронных ускорителей**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск-2009

Работа выполнена на кафедре Прикладной физики ГОУ ВПО  
«Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор  
Потылицын Александр Петрович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
Внуков Игорь Евгеньевич

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Найден Евгений Петрович

**Ведущая организация:** Учреждение Российской академии наук  
Петербургский институт ядерной физики  
им. Б.П.Константинова

Защита состоится “27” октября 2009 г. в 14 часов 30 минут на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 30, ауд. 228 (10 корпус ТПУ)

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан “25” сентября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

 О.Ю. Долматов

# **Общая характеристика работы**

## **Актуальность темы**

Среди практических применений рентгеновского излучения, генерируемого рентгеновскими трубками, следует отметить системы диагностики в медицине и системы анализа и контроля в науке, энергетике и транспорте. Однако современный уровень требований к параметрам источников рентгеновского излучения на основе рентгеновских трубок в ряде случаев не может быть достигнут. Во многих приложениях можно существенно понизить предъявляемые требования при использовании монохроматического излучения. Особенно актуальным является вопрос о создании нового источника рентгеновского излучения для медицинских целей, который должен обладать достаточной интенсивностью излучения с одной стороны и монохроматичностью с другой. Использование узконаправленных монохроматических пучков рентгеновского излучения с регулируемым положением линии в спектре позволяет улучшить контраст изображения и снизить дозовые нагрузки на организм, за счет «выделения» из непрерывного спектра излучения линии определенной энергии. Подобные установки, реализованные на базе синхротронного излучения, в полной мере подтвердили свое преимущество. Однако в силу высокой стоимости и больших размеров источников синхротронного излучения возможности их широкого использования, как в медицинских, так и других целях весьма ограничены.

Таким образом, исследование методов генерации монохроматического излучения и методов увеличения интенсивности источников монохроматического излучения на базе электронных ускорителей средних энергий ( $\leq 50$  МэВ) является весьма актуальной задачей. Подобные установки могут заполнить «нишу» между традиционными рентгеновскими трубками и источниками синхротронного излучения.

## **Цели и задачи работы**

Целью настоящей работы является экспериментальные и теоретические исследования методов монохроматизации пучков излучения электронных ускорителей средних энергий и разработка схемы источника монохроматического рентгеновского излучения с перестраиваемой длиной волны на базе бетатрона с перспективой использования в медицине.

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

1. Разработка компьютерной программы для моделирования генерации тормозного излучения электронов средних энергий с учетом реальных условий эксперимента.

2. Экспериментальное и теоретическое исследование двух механизмов генерации монохроматического рентгеновского излучения: параметрического рентгеновского излучения и дифракционного тормозного излучения в геометрии Брэгга, сравнение этих механизмов по эффективности генерации для электронных ускорителей средних энергий, а также проверка адекватности разработанной компьютерной программы при сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными.

3. Исследование характеристик источника монохроматического излучения на основе механизма дифракции тормозного излучения микротрона и сравнение с возможностями рентгеновской трубки.

4. Исследование процесса многократной генерации тормозного излучения в тонкой мишени бетатрона, как механизма увеличения интенсивности.

5. Разработка системы цифровой рентгенографии для импульсного источника монохроматического рентгеновского излучения.

6. Разработка схемы монохроматического источника рентгеновского излучения на базе малогабаритного электронного ускорителя электронов средних энергий – бетатроне.

## **Научная новизна**

Основные результаты, полученные в работе, являются новыми.

1. В работе предложена новая схема источника монохроматического рентгеновского излучения на базе бетатрона на энергию 18 МэВ.

2. Предложена оригинальная методика определения кратности прохождения электронов через тонкую мишень при генерации тормозного излучения в бетатроне.

3. Экспериментально исследованы спектральные характеристики дифракционного тормозного и параметрического рентгеновского излучений на пучке электронов с энергий 5,7 МэВ.

4. Проведены экспериментальные измерения и получены результаты численного моделирования для сравнения интенсивностей монохроматического излучения рентгеновской трубки и ускорителей электронов средних энергий;

5. Разработана импульсная система цифровой рентгенографии на основе арсенид галлиевых детекторов сканирующего типа.

## **Теоретическая и практическая ценность работы**

В диссертации рассмотрена возможность создания источника монохроматического рентгеновского излучения с регулируемой длиной волны на основе дифракции рентгеновского излучения от электронов средних энергий. Исследованы спектральные характеристики предложенного источника на базе малогабаритного ускорителя - бетатрона с энергией 18 МэВ. В результате сравнения предложенного источника с рентгеновской

трубкой выявлено преимущество первого по следующим параметрам: монохроматичность; уменьшение дозовой нагрузки на исследуемый объект, которая может быть снижена на порядок; перекрываемый энергетический диапазон от 5 до 130 кэВ. Предложенная в диссертации схема источника на базе серийно выпускаемых бетатронов имеет меньшую стоимость (два - три порядка) по сравнению с источниками синхротронного излучения и источниками, реализованными на механизме параметрического излучения.

Разработанная программа численного моделирования позволяет исследовать характеристики рентгеновского пучка полученного на основе механизма дифракции тормозного излучения электронов, как от средних, так и от релятивистских энергий.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных измерений и численного моделирования характеристик параметрического и дифракционного рентгеновского излучений от электронов средних энергий.

2. Результаты экспериментальных измерений многократной генерации тормозного излучения в бетатроне и методика определения кратности прохождения электронов через тонкую мишень.

3. Программа численного моделирования процесса генерации тормозного излучения электронов средних энергий с учётом многократного рассеяния электронов, конечных размеров и расходимости электронного пучка, апертуры детектора, потерь энергии на ионизацию и поглощения излучения в мишени, реализованная методом Монте-Карло.

4. Схема источника рентгеновского монохроматического излучения с перестраиваемой длиной волны на базе бетатрона с тонкой внутренней мишенью и механизма дифракции «мягкого» тормозного излучения.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в постановке задач, разработке методов и алгоритмов для их решения, проведении экспериментальных исследований, создании программы для моделирования исследуемых процессов, обработке данных, формулировке выводов в статьях, докладах и диссертации. Результаты, опубликованные в работах [9–19], получены при основном участии автора.

### **Апробация диссертации и публикации**

Результаты диссертации докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. XX<sup>th</sup> Russian conference on charged particle accelerators «RUPAC'06», 2006, Novosibirsk;

2. V конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 2007, Харьков;
  3. XXXVII Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 2007, Москва;
  4. VII International symposium «RREPS-07», 2007, Prague, Czech Republic;
  5. IV Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной энергетики», 2007, Томск;
  6. 4 International Summer School on Nuclear Physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine, 2007, Prague, Czech Republic;
  7. Российская научно-практическая конференция (с международным участием) «Физико-технические проблемы получения и использования пучков заряженных частиц, нейтронов, плазмы и электромагнитного излучения», 2007, Томск;
  8. XXI Russian conference on charged particle accelerators «RUPAC'08», 2008, Zvenigorod;
  9. 3rd International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena (Channeling - 2008), 2008, Erice, Italy;
  10. Научная сессия МИФИ, 2009, Москва.
- По теме диссертации опубликовано 5 статей в отечественной и зарубежной научной печати, а также 6 тезисов докладов на международных конференциях.

## **Структура и объем диссертации**

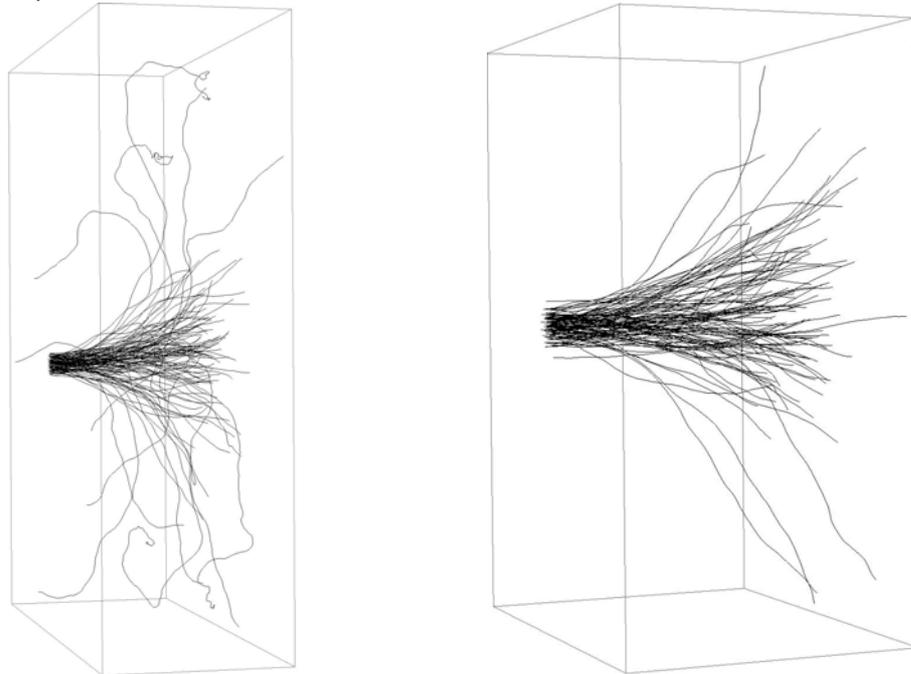
Диссертация состоит из введения, шести глав, четырёх приложений, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 116 библиографических ссылки. Общий объем диссертации составляет 110 страниц. Работа содержит 56 рисунков и 9 таблиц.

## **Краткое содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведены историческая справка, краткий обзор литературы по проблеме, состояние исследований к моменту начала работы. Дано описание структуры диссертации и сформулированы цель и основные задачи, решаемые в ней, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации кратко описаны классическая теория и основные результаты квантовой теории тормозного излучения (ТИ) заряженными частицами, представлены рабочие формулы для расчета спектрально-углового распределения. Приведены основные выводы кинематической теории параметрического рентгеновского излучения и дифракции рентгеновского излучения на кристаллах. Разработана компьютерная программа в среде Mathematica для численного моделирования спектров тормозного излучения при генерации пучком

электронов с энергиями от 500 кэВ до 50 МэВ. Программа основана на моделировании методом Монте-Карло. Программа позволяет учитывать геометрические размеры пучка и его распределение в объеме, расходимость и энергетический разброс для мишени из любого материала и толщины. Для учета многократного рассеяния электронов в толстых мишенях применяется распределение Мольера [1]. На рис. 1 для иллюстрации приведены треки электронов с энергией 6 МэВ в вольфраме (W) толщиной 1,5 мм и меди (Cu) толщиной 1,5 мм.



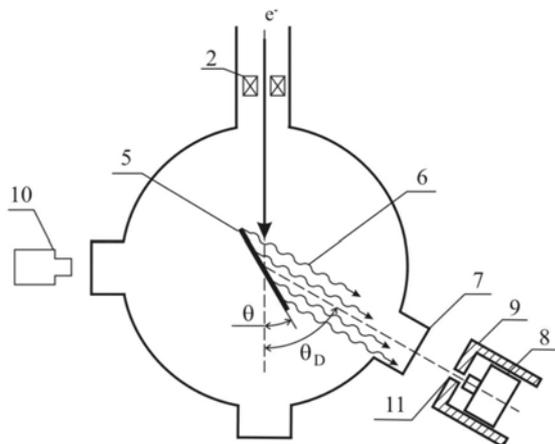
**Рис. 1.** Результаты расчета траекторий электронов в вольфраме (слева) и меди (справа), параметры пучка: энергия 6 МэВ; поперечные размеры  $\sigma_{x,y} = 1,5$  мм; расходимость  $\sigma_{ex,ey} = 5$  мрад.

**Во второй главе** диссертации описаны экспериментальные исследования двух различных механизмов генерации монохроматического рентгеновского излучения – параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) в кристаллах вольфрама и пиролитического графита и дифракции тормозного излучения (ДТИ) при рассеянии тормозного излучения на тех же кристаллах в той же геометрии. Измерения были выполнены на пучке электронов с энергией 5,7 МэВ микротрона НИИ ЯФ ТПУ.

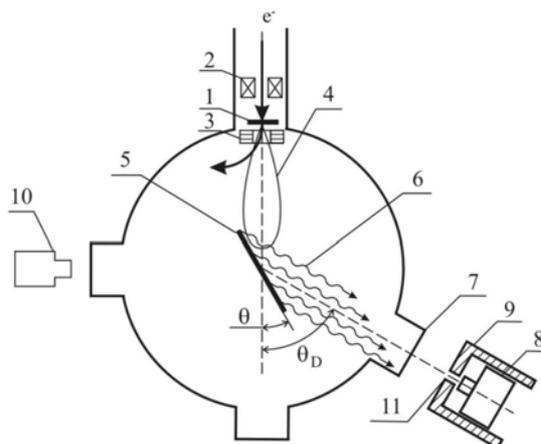
На установке было выполнено два типа спектральных измерений, в которых кристаллическую мишень либо пересекает пучок электронов (измеряется спектр ПРИ в присутствии вклада ДТИ), либо через кристалл проходит пучок тормозного излучения (регистрируется только спектр ДТИ). Спектры излучения регистрируются в совершенно одинаковых условиях (с использованием одних и тех же детектирующей аппаратуры, мишеней, геометрии измерений).

На рис. 2.а и 2.б приведены схемы размещения экспериментального оборудования по регистрации ПРИ и ДТИ.

Измерения проводились путём набора спектров излучения для различных углов наклона кристалла к оси пучка электронов  $\theta$  в диапазоне от пороговой энергии (5 кэВ) до максимальной (45 кэВ). На рис. 3 приведен измеренный спектр ПРИ электронов в пиролиитическом графите (ПГ) для угла ориентации кристалла  $\theta = \theta_A = 30^\circ$ .

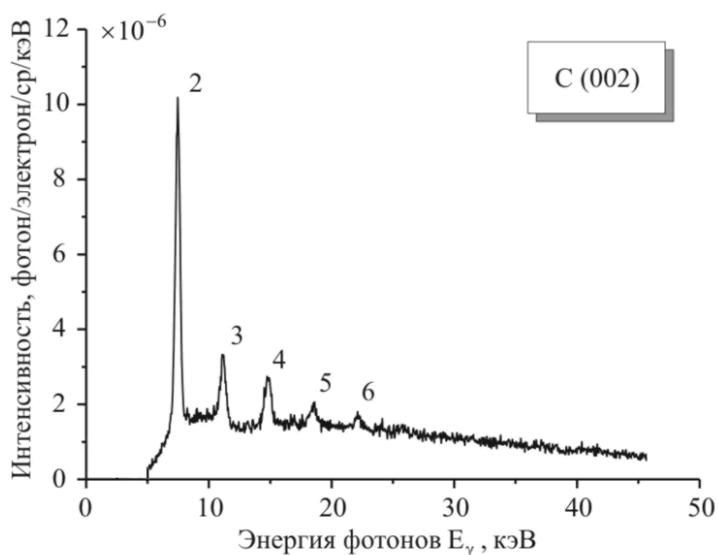


**Рис. 2.а.** Схема эксперимента по регистрации ПРИ.



**Рис. 2.б.** Схема эксперимента по регистрации ДТИ.

1 – алюминиевый конвертор (125 мкм), 2 – датчик тока, 3 – отклоняющий магнит, 4 – поток тормозного излучения, 5 – кристалл (W, C) закрепленный в гониометре, 6 – ПРИ (ДТИ), 7 – выходное окно (каптон, 150 мкм), 8 – ППД, 9 – свинцовая защита, 10 – видеокамера, 11 – коллиматор.

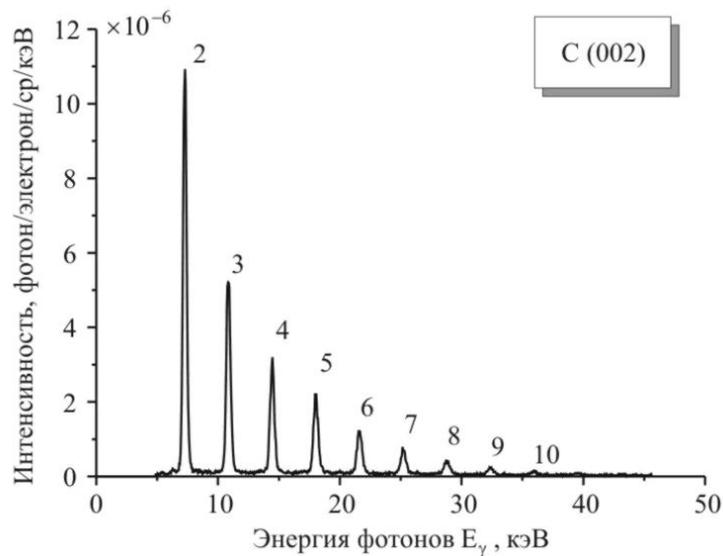


**Рис. 3.** Спектр ПРИ электронов на кристалле ПГ.

На рисунке отчетливо видны максимумы дифракции виртуальных фотонов, соответствующие ( $n = 2, 3, \dots, 6$ ) порядкам дифракции и энергиям (7,46; 11,10; ... 22,11 кэВ). Первый порядок дифракции не был зарегистрирован т.к. находится вне области чувствительности детектирующей аппаратуры. Ширина линии второго дифракционного максимума ( $n = 2$ ) на полувысоте составляет  $\Delta = 450 \text{ \AA}$ . Выход фотонов ПРИ

из кристалла ПГ составляет  $8 \cdot 10^{-6}$  фотон/(электрон ср) (с поправкой на ослабление излучения на пути к детектору и с вычитанием фона). Фоновая подложка в спектре объясняется вкладом диффузионного рассеянного тормозного излучения электронов.

На рис. 4 представлен спектр дифракции реальных фотонов тормозного излучения электронов на кристалле ПГ, измеренный при угле ориентации кристалла  $\theta = \theta_A = 30^\circ$ . Наблюдаемые пики соответствуют порядкам дифракции ( $n = 2, 3, \dots, 10$ ) и энергиям (7,29; 10,83; ... 35,97 кэВ)



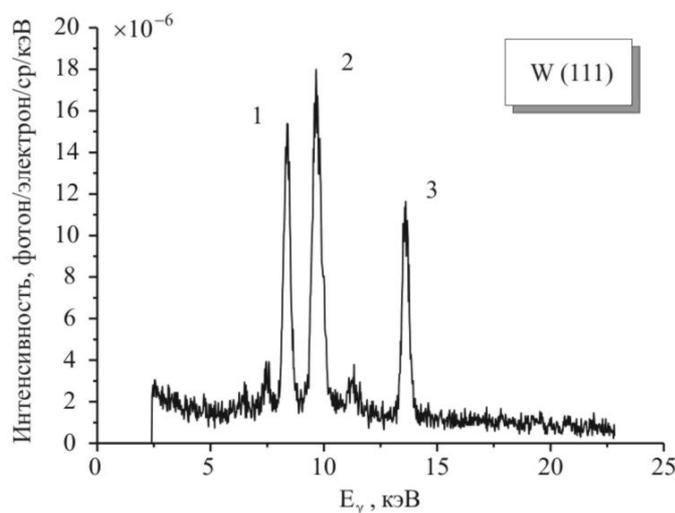
**Рис. 4.** Спектр ДТИ на кристалле ПГ.

Ширина линии второго порядка дифракции на полувысоте составляет  $\Delta = 340 \text{ \AA}$ . Выход ДТИ из кристалла ПГ составляет в максимуме ( $n=2$ )  $8,5 \cdot 10^{-6}$  фотон/(электрон ср). Если сравнить измеренные спектры ПРИ и ДТИ на ПГ (рис. 3 и рис. 4), то последний демонстрирует значительно более высокое отношение пик/фон ( $\eta_{iDE} = 10, \eta_{\Delta DE} = 100$ ), причём здесь практически отсутствует фоновая подложка, вызванная диффузным рассеянием тормозного излучения. Процесс ДТИ обеспечивает более узкую линию излучения по сравнению с ПРИ, что связано с влиянием процесса многократного рассеяния электронов в кристалле, а также с более широким конусом, а также с более широким конусом начального пучка виртуальных фотонов.

На рис. 5 приведён спектр дифракции тормозного излучения в кристалле вольфрама W(111), измеренный при угле ориентации кристалла  $\theta = \theta_A = 30^\circ$ . Пик 3 ( $E_\gamma = 13,61 \text{ кэВ}$ ) соответствует первому разрешённому рефлексу ДТИ, пики 1 ( $E_\gamma = 8,39 \text{ кэВ}$ ) и 2 ( $E_\gamma = 9,67 \text{ кэВ}$ ) соответствуют линиям характеристического излучения вольфрама  $L_\alpha$  и  $L_\beta$ . Зарегистрированные пики ХРИ представляют интерес для независимой калибровки и абсолютизации выхода фотонов ДТИ.

Ширина линии ДТИ на полувысоте составляет  $\Delta = 350 \text{ \AA}$ . Спектрально-угловая плотность ДТИ на кристалле вольфрама составляет  $7 \cdot 10^{-6}$  фотон/(электрон ср кэВ).

На кристалле вольфрама также были проведены измерения спектров излучения при прохождении через кристалл электронов (поиск ПРИ). Однако однозначно выделить ожидаемый пик ПРИ на фоне линий ХРИ и тормозного фона не удалось. Вероятная причина этого в относительно большой толщине кристалла. Так в работе [2] указывается, что оптимальная толщина вольфрама для энергии ПРИ  $E_\gamma = 15 \text{ \AA}$  составляет 3,8 мкм.



**Рис. 5.** Спектр излучения на кристалле W (111). Пики 1 и 2 – ХРИ, пик 3 – ДТИ.

Измеренные спектры ПРИ и ДТИ на кристалле пиролитического графита показывают, что механизмы дифракции виртуальных и реальных фотонов обеспечивают эффективную генерацию рентгеновского излучения с квазимонохроматическим спектром. Анализируя полученные экспериментальные результаты, можно сделать вывод о том, что на базе механизма ДТИ можно создать рентгеновский источник с более контрастным линейчатым спектром, и более высоким (на порядок) отношением  $\eta$  (пик/фон), чем на основе ПРИ.

Одной из поставленных задач в работе является доказательство адекватности реализованной компьютерной программы расчета выхода ДТИ в сравнении с экспериментом. В данных экспериментах результаты расчета согласуются с экспериментальными не хуже 15 %, что подтверждает пригодность использования программы численного моделирования для поставленной цели.

**В третьей главе** диссертации для сравнения параметров источника монохроматического излучения, основанного на базе электронных ускорителей (микротрон, бетатрон), с параметрами монохроматического пучка излучения рентгеновской трубки, были проведены эксперименты по монохроматизации поля излучения последнего. Эксперименты проведены на источнике рентгеновского излучения рентгенофлуоресцентной установки дифракционного типа ИРИС – 6.

Для сравнения с результатами, полученными во второй главе, в таб. 1 представлены выходы монохроматического рентгеновского излучения для «близких» параметров геометрии. Из представленных данных видно, что

выход излучения в расчете на один электрон и в единицу телесного угла для микротрона превышает выход излучения рентгеновской трубки на 5 порядков.

Таблица 1. Параметры источников и монохроматического излучения.

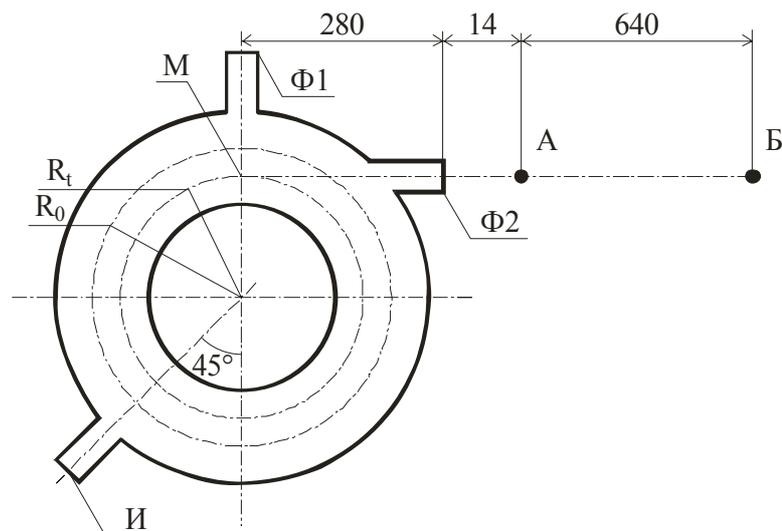
Источник первичного излучения	Микротрон	Рентгеновская трубка
Средний ток	0,3 мА	10 мА
Энергия ускоренных электронов	5,6 МэВ	40 кэВ
Кристалл - монохроматор	Пиролитический графит (002)	
Угол ориентации кристалла	30 градусов	49 градусов
Порядок дифракции	2	3
Энергия дифракционной линии	7,29 кэВ	7,9 кэВ
Выход монохроматического излучения, фотон/(электрон ср)	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$

Это связано с тем, что угловое распределение тормозного излучения микротрона за счет высокой энергии электронов распределено в узком ( $\sim 5^\circ$ ) телесном угле и практически полностью дифрагирует на кристалле и регистрируется детектором. Угловое распределение излучения рентгеновской трубки значительно шире ( $\sim 60^\circ$ ) и дифрагирует, следовательно, регистрируется детектором, только малая её часть. Вторым фактором, который вносит свой вклад в выход излучения – это толщина мишени. В случае эксперимента на микротроне (см. рис. 2.) мишень была тонкой (125 мкм), что позволило сместить спектральный максимум тормозного излучения в области энергий 5 – 10 кэВ.

Если провести сравнение этих источников для систем рентгенографии, например, в коронарной ангиографии, где требуются поля рентгеновского излучения (в нашем случае монохроматического) в короткие интервалы времени  $\sim 1$  мс, то источник, реализованный на базе микротрона, имеет еще одно значительное преимущество. Поскольку микротрон работает в импульсном режиме (с частотой следования импульсов 25 Гц, 0,6 мкс) за время 1 мс (один цикл ускорения) возможно получить выход монохроматического рентгеновского излучения  $\sim 1,6 \cdot 10^{10}$  фотон/ср. Рентгеновская трубка, которая работает в непрерывном режиме (ток 10 мА) за время 1 мс способна обеспечить выход монохроматического рентгеновского излучения  $\sim 1,5 \cdot 10^3$  фотон/ср, что на семь порядков ниже по сравнению с источником на базе микротрона.

Основной проблемой при создании источников рентгеновского монохроматического излучения является относительно небольшой выход излучения. Одним из способов увеличения выхода тормозного излучения электронных ускорителей и, как следствие, монохроматического рентгеновского излучения является использование тонкой мишени для генерации ТИ в циклических ускорителях, что может обеспечить кратность прохождения электронов через мишень более единицы [3].

В качестве инжектора может быть использован любой ускоритель электронов на средние энергии, в том числе и линейный ускоритель [4]. Мишень для генерации тормозного излучения устанавливается на равновесную орбиту. Если мишень достаточно тонкая (составляет десятки мкм для малых  $Z$ , и единицы для средних  $Z$ ), то в силу малых ионизационных и радиационных потерь энергии электрона на столкновение и излучение происходит многократное прохождение пучка электрона через мишень и, как следствие, увеличение выхода ТИ. В работе [5] было экспериментально показано, что кратность прохождения электронов через мишень (среднее количество проходов одного электрона через мишень) в бетатроне на энергию 33 МэВ может достигать 200. В четвертой главе диссертации исследуются характеристики тормозного излучения при многократном прохождении электронного пучка через тонкую мишень бетатрона на энергию 33 МэВ бетатронной лаборатории НИИ Интроскопии ТПУ. В отличие от схем [3, 4] использование бетатрона с тонкой мишенью приводит к существенному удешевлению конструкции при некоторой потере в интенсивности излучения ускоренного электронного пучка. Отличие данного эксперимента от [5] заключается в том, что используются спектральные, а не интегральные характеристики поля излучения для определения кратности прохождения электронов.



**Рис. 6.** Схема эксперимента по многократной генерации ТИ.

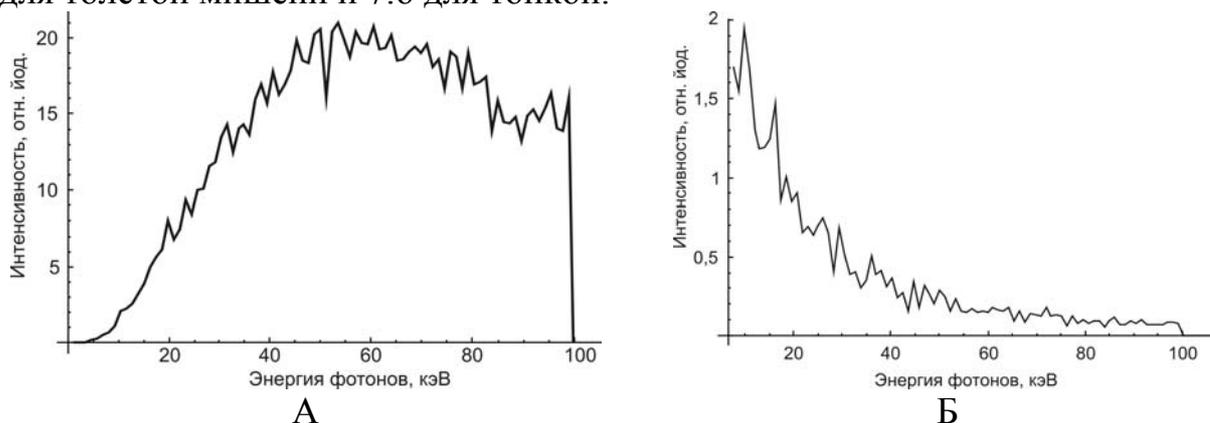
На рис. 6 приведена схема эксперимента с расположением экспериментального оборудования. Инжекция электронов в ускорительную камеру осуществляется инжектором, расположенном во фланце И (см. рис.

б). Затем происходит ускорение электронов на равновесной орбите  $R_0$  до энергии 33 МэВ. Число ускоренных электронов в каждом цикле составляет около  $10^{10}$  электронов, частота следования импульсов излучения составляет 50 Гц. Мишень генерации ТИ расположена в точке М на орбите сброса. В данной схеме в отличие от схем, предложенных в работах [3, 4] ускорение и генерация происходит в одной камере, но на разных орбитах движения электронов.

В эксперименте использовался мишенедержатель с двумя медными мишенями. Первая имела толщину 6 мкм, вторая 1,6 мм. ТИ выходит из ускорительной камеры через фланец Ф2. В эксперименте проводились измерения дозового поля излучения для разных мишеней в двух точках А и В (рис. 6). Для измерения дозовых распределений использовали терапевтический дозиметр UNIDOS E [6]. В точке В измерения проводились ионизационной камерой PTW 30013 Waterproof Farmer chamber [6], имеющей высокую энергетическую чувствительность в диапазоне от 30 кэВ до 50 МэВ. В точке А были проведены измерения мощности поглощенной дозы поля тормозного излучения ионизационной камерой 23342 Soft X-ray chamber,  $0.02 \text{ см}^3$  [6], имеющей высокую энергетическую чувствительность в диапазоне от 15 до 100 кэВ. Мощность дозы, усредненная по 10 измерениям, составила 10 мкГр/с для толстой мишени (1.6 мм) и 16 мкГр/с для тонкой мишени (6 мкм).

Для интерпретации полученных экспериментальных данных была использована разработанная программа моделирования генерации ТИ с использованием метода Монте-Карло.

Для оценки выхода ТИ из толстой и тонкой мишеней в точке А был промоделирован спектр тормозного излучения, соответствующий апертуре реального детектора. Результат моделирования представлен на рисунке 7.а для толстой мишени и 7.б для тонкой.



**Рис. 7.** Спектры тормозного излучения для толстой мишени (а) и тонкой мишени (б).

Разброс кривых на графиках объясняется сравнительно небольшой статистикой ( $10^4$  электронов). На графиках не приведены линии характеристического излучения меди, поскольку они лежат вне чувствительной области детектора. В случае тонкой мишени наблюдается

увеличение выхода фотонов в мягкой части спектра ( $\hbar\omega \leq 40$  кэВ), тогда как в схеме от толстой мишени наблюдается самопоглощение фотонов с  $E < 50$  кэВ.

Как отмечалось ранее, в точке А была измерена мощность дозы поля ТИ. Зная спектральный состав излучения в заданном диапазоне можно определить радиационные потери в единицу времени в заданную апертуру:

$$\dot{E} = \int_a^b \frac{dI}{d\hbar\omega} \hbar\omega d(\hbar\omega) \quad (1)$$

где  $\hbar\omega$  – энергия квантов тормозного излучения,  $\frac{dI}{d\hbar\omega}$  фотонный спектр излучения в единицу времени (рис. 7.), а и b минимальный и максимальный порог чувствительности детектора,  $\mu(\hbar\omega)$  – массовый коэффициент поглощения.

Мощность дозы  $\dot{D}$  можно определить из (1):

$$\dot{D} = K \cdot n \cdot \dot{E} \cdot \mu(\hbar\omega) \quad (2)$$

где  $n$  – кратность прохождения электронов через мишень, коэффициент  $K$  учитывает геометрию облучения, объем камеры, количество электронов и т.д.

Коэффициент пропорциональности  $K$  можно оценить для обоих случаев (тонкой и толстой мишени):

$$K \cdot n = \frac{\dot{D}}{\dot{E} \cdot \mu(\hbar\omega)} \rightarrow \begin{aligned} n \cdot K_{\text{Thin target}} &= \frac{\dot{D}_{\text{Thin target}}}{n \int_a^b \frac{dI_{\text{Thin target}}}{d\hbar\omega} \hbar\omega \cdot \mu(\hbar\omega) d(\hbar\omega)} = 137.2 \cdot 10^{-7} \\ n \cdot K_{\text{Thick target}} &= \frac{\dot{D}_{\text{Thick target}}}{n \int_a^b \frac{dI_{\text{Thick target}}}{d\hbar\omega} \hbar\omega \cdot \mu(\hbar\omega) d(\hbar\omega)} = 1.3 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \quad (3)$$

Так как все параметры (геометрия, количество электронов и т.д.) в обоих случаях были одинаковы то  $K_{\text{Thin target}} \approx K_{\text{Thick target}}$ . Полагая, что кратность прохождения электронов через толстую мишень не превышает 1, из (3) можно определить кратность прохождения электронного пучка через тонкую мишень из отношения  $n = \frac{K_{\text{Thin target}}}{1 \cdot K_{\text{Thick target}}} \approx 10^2$ .

В случае использования бетатрона в качестве источника тормозного излучения подтверждена возможность многократного прохождения электронов через тонкую мишень, что позволяет увеличить интенсивность пучка ТИ и монохроматического рентгеновского излучения, если на выходе излучения установить кристалл-монохроматор. Необходимо подчеркнуть, что использование тонких мишеней позволяет сместить спектральный максимум излучения в мягкую часть спектра.

В перспективе полученные в работе результаты демонстрируют возможность создания источника монохроматического рентгеновского излучения с регулируемой длиной волны, основанного на бетатроне, который

имеет преимущества источников монохроматического СИ и значительно отличаются по стоимости установки и эксплуатации.

К источникам рентгеновского излучения, которые могут быть использованы в рентгенографии, предъявляется ряд требований, одним из которых является их интенсивность. Плотность потока излучения не должна быть менее  $10^7$  фотон/мм<sup>2</sup> [7]. Поэтому сейчас медицина испытывает недостаток в новых системах рентгенографии способных быстро и с хорошим разрешением отобразить аномалии строения внутренних органов человека или какого-либо другого объекта. Помимо этого дефектоскопия нуждается в системах рентгенографии для выявления дефектов материалов и определения качества сварочных соединений. Для снижения необходимой интенсивности излучения целесообразно развивать современные системы цифровой рентгенографии. В настоящее время особое внимание уделяется системам, чувствительный элемент которых, представляет собой линейку или матрицу полупроводниковых детекторов.

**В пятой главе** представлена разработка системы цифровой рентгенографии основанной на GaAs детекторах. Этот прототип в течение нескольких лет разрабатывается в ГНЦ ИФВЭ (г. Протвино МО). В этих системах используются детекторы прямого преобразования рентгеновского излучения в электрический сигнал. Детекторы изготавливаются на компенсированном хромом GaAs резистивного типа [8]. Они имеют высокую эффективность регистрации излучения (близкую к 100%) для используемых в медицине энергий рентгеновского излучения (менее 200 кэВ). Кроме того, GaAs детекторы обладают высокой радиационной стойкостью, по сравнению с газонаполненными приборами и кремниевыми фотодиодами.

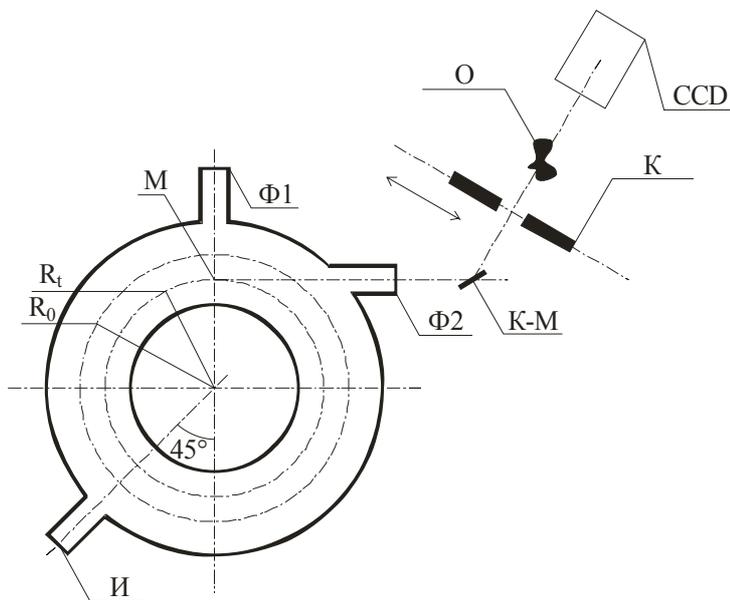
Линейка детекторов состоит из пяти микростриповых сборок по 128 чувствительных элементов длиной 25,6 мм, и представляет 640 чувствительных элементов, общей продолжительностью 128 мм и шириной 200 мкм. В главе представлены технические характеристики регистрирующего модуля и результаты измерения, выполненные на рентгеновской трубке в стационарном режиме, для настройки и отладки режимов работы модуля, а также в импульсном режиме на источнике тормозного излучения - индукционном ускорителе электронов – бетатроне МБ-6.

Полученные результаты демонстрирует, что разработанная система цифровой рентгенографии способна работать в импульсном режиме в условиях низкой плотности потока рентгеновского излучения. Качество полученных изображений удовлетворяют необходимым требованиям в дефектоскопии. Для повышения чувствительности системы необходима модернизация электронных схем синхронизации модуля с источником рентгеновского излучения.

Для удешевления стоимости источника монохроматического рентгеновского излучения, что может являться основным конкурентным

преимуществом, в работе было предложено рассмотреть схему на базе бетатрона.

В шестой главе диссертации рассмотрена новая схема источника монохроматического рентгеновского излучения с регулируемой длиной волны на основе дифракции тормозного излучения бетатрона. Результаты представленные в настоящем разделе и параметры схемы были получены с помощью численного моделирования описанного в разделе 1.4.



**Рис. 8.** Схема источника

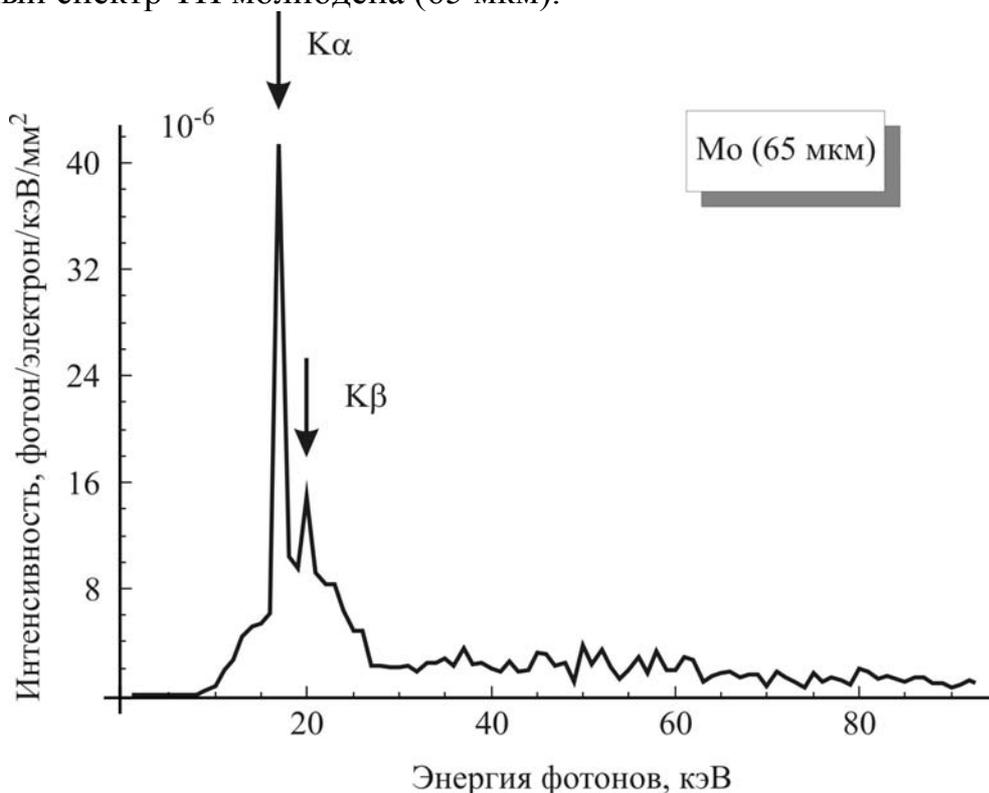
На рис. 8 представлена схема источника монохроматического рентгеновского излучения на базе бетатрона.

**Таблица 2.** Параметры бетатрона Б-18

Тип бетатрона	6 – стоечный	
Максимальная энергия электронов	18	МэВ
Средний ток	0.55	мкА
Количество захваченных в ускорение электронов	$10^{10}$	
Частота следования импульсов	150	Гц
Время ускорения	2	мс
Время генерации излучения	2	мкс
Радиус равновесной орбиты, $R_0$	128	мм
Радиус орбиты сброса, $R_t$	110	мм
Напряжение инжекции	60	кВ
Доза излучения на расстоянии 1 м	100	сГр/мин

В качестве источника тормозного излучения предлагается использовать серийно-выпускаемый бетатрон Б-18 (НИИ Интроскопии ТПУ) на максимальную энергию электронов 18 МэВ. Основные параметры бетатрона представлены в таб. 2. На рис. 8 представлена камера ускорителя, где  $R_0$  - равновесная орбита,  $R_i$  - орбита сброса электронов на мишень, И – фланец размещения инжектора электронов, Ф1 – фланец размещения мишени (генератора ТИ), М место установки мишени, Ф2 – фланец выхода ТИ из камеры бетатрона. На выходном пучке ТИ устанавливается кристалл-монохроматор (К-М), затем дифрагированное тормозное излучение коллимируется коллиматором (К), который имеет возможность перемещаться в перпендикулярном направлении относительно направления ДТИ, за коллиматором расположен исследуемый объект (О), прошедшие через объект кванты ДТИ регистрируются линейкой GaAs детекторов (CCD).

Мишень для генерации ТИ выбрана таким образом, что бы максимум ТИ был расположен в области 20 – 30 кэВ и толщина составляет 70 – 90 мкм для молибдена. Молибден выбран потому, что в спектре ТИ будет присутствовать характеристическое рентгеновское излучение соответствующее  $K_{\alpha 1,2} = 17,4 \text{ \AA}$  и  $K_{\beta 1,2} = 19,7 \text{ \AA}$ , что позволит увеличить выход излучения в этом энергетическом диапазоне. На рис. 9 показан расчетный спектр ТИ молибдена (65 мкм).

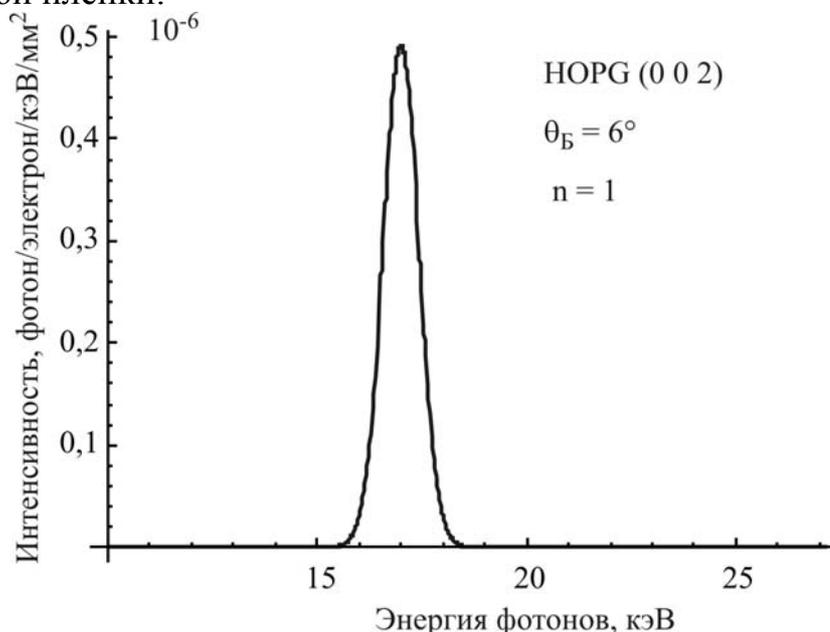


**Рис. 9.** Рассчитанный спектр ТИ и ХРИ молибдена

На рисунке приведена интенсивность излучения в расчете на электрон и апертуру детектора в  $1 \text{ мм}^2$  на расстоянии 20 см от мишени (место расположения кристалла-монохроматора). Моделирование было проведено для относительно небольшой статистики электронов ( $10^4$ ). Спектр

монохроматического рентгеновского излучения после дифракции на кристалле пиролитического графита (0 0 2), ориентированным под углом (угол Брэгга) 6 градусов представлен на рис. 10.

Среднее количество электронов захваченных в ускорение в бетатроне Б18 составляет  $10^{10}$  электронов. Выход монохроматического излучения на один электрон на кристалле пиролитического графита для энергии 17,5 кэВ составляет  $0,523 \cdot 10^{-6}$  фотон/электрон/(кэВ/мм<sup>2</sup>) и одного цикла ускорения  $5,23 \cdot 10^3$  фотон/электрон/(кэВ/мм<sup>2</sup>). Одним из основных преимуществ бетатрона заключается в относительно высокой частоте следования импульсов излучения, т.о. за 1 сек можно получить поток квантов монохроматического излучения  $0,8 \cdot 10^6$  фотон/электрон/(кэВ/мм<sup>2</sup>). При использовании систем цифровой рентгенографии, например, на основе GaAs детекторов, предоставляется возможность получать высококачественные рентгеновские снимки при плотности потока рентгеновского излучения на один, два порядка ниже, чем для стандартной рентгеновской пленки.



**Рис. 10.** Спектр монохроматического рентгеновского излучения

Из сравнения предложенного источника со стандартной рентгеновской трубкой следует, что первый будет обладать рядом преимуществ: монохроматичность излучения, что позволит увеличить контрастность исследуемого объекта и снизить дозовую нагрузку два порядка [11].

**В заключении** излагаются основные результаты диссертации.

**В Приложении I** Приведены основные параметры кристаллов, используемых в рентгеновской дефектоскопии.

**В Приложении II** приводятся характеристики детектора БДЕР-КИ-11К, использовавшегося для регистрации параметрического рентгеновского дифракционного тормозного и характеристического излучений.

**В Приложении III** приводятся характеристики детектора UNIDOS-E, использовавшегося для измерения мощности дозы.

В **Приложении IV** приводится методика численной обработки результатов измерения, полученных системой цифровой рентгенографии на базе GaAs детекторов.

## **Основные результаты работы**

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана программа для моделирования процесса генерации тормозного излучения и характеристик поля излучения электронов с энергией 0,5 – 50 МэВ с учётом многократного рассеяния электронов, конечных размеров и расходимости пучка, апертуры детектора, потерь энергии на ионизацию и поглощения излучения в мишени, кристалле. Продемонстрировано хорошее согласие результатов численного моделирования с результатами экспериментов.

2. Исследованы методы монохроматизации излучения на основе механизмов параметрического рентгеновского излучения и дифракции рентгеновского излучения в кристаллах. Проведены измерения, позволяющие сравнить эти механизмы и параметры источников, реализованных на разных электронных ускорителях (микротрон, бетатрон, рентгеновская трубка). Показано, что для энергий электронов  $< 15$  МэВ дифракция ТИ является предпочтительным механизмом по сравнению с ПРИ.

3. Исследован механизм многократной генерации тормозного излучения в бетатроне, предложена оригинальная методика определения кратности прохождения электронов через мишень, показана возможность достижения  $10^2$  кратности.

4. Апробирована система цифровой рентгенографии на основе линейки GaAs детекторов для работы на импульсном пучке бетатрона.

5. Предложена и обоснована новая схема источника рентгеновского монохроматического излучения с перестраиваемой длиной волны на базе серийного бетатрона Б-18. Интенсивность источника и ширина спектральной линии при использовании кристалла пиролитического графита, составляют  $10^5$  ф/с и 0,6 кэВ, соответственно. Проведён сравнительный анализ этого источника и рентгеновской трубки, который показал ряд преимуществ, позволяющих увеличить пространственное разрешение изображений и на порядок уменьшить дозовую нагрузку на объект. В сравнении с источниками, основанными на СИ и ПРИ предложенная схема является более дешевой, что может быть решающим фактором при создании новой линии рентгеновских источников, занимающих нишу между рентгеновскими аппаратами и мощными источниками монохроматического рентгеновского излучения на основе СИ.

## Цитируемая литература:

1. В.И. Беспалов. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом// Томск: ТПУ – 2007.
2. Danon Y., Sones B., Block R.C. Production and application of a novel, energy-tunable x-ray source at the RPI LINAC.// Proceedings. CAARI. Fort Worth. Texas. 2006.
3. H. Yamada // NIM B – 2003 – V. 199 – P. 509.
4. В.К. Гришин, Б.С. Ишханов, С.П. Лихачев. Высокоэффективные источники широко-спектрального и монохроматического рентгеновского и гамма-излучения// Известия высших учебных заведений. ФИЗИКА. – 2000 – Т. 44 – 3 – С. 88.
5. V.V. Kaplin, S.R. Uglov, et.al.// Review of Scientific Instruments – 2002 – V. 73 – N 1 – P. 63
6. [http://www.cpce.ru/tools/rtad\\_unidos.shtml](http://www.cpce.ru/tools/rtad_unidos.shtml)
7. E. B. Podgorsak et al. Radiation oncology physics// International Atomic Energy Agency, Vienna – 2005.
8. G.I. Ayzenshtat, E.A. Babichev, S.E. Baru, V.R. Groshev, G.A. Savinov, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev//NIM A – 2003 – V. 509 – P. 268

## Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

9. A.R. Wagner, A.P. Potylitsyn, V.V. Kashkovskiy, Y.N. Adishev, S.A. Gorokhov, M.K. Polkovnikov, Yu.V. Rodnov, A.P. Vorobiev, R.E. Rydenko, G.I. Ayzenshtat, O.P. Tolbanov. The use of betatron gamma-beam for digital radiographic technique// Proceedings of the RUPAC 2006, Novosibirsk, Russia (September 2006) <http://rupac2006.inp.nsk.su/ready/molp17.pdf>
10. Забаев В.Н., Разин С.В., Углов С.Р., Вагнер А.Р., Потылицын А.П., Кузнецов С.И. Монохроматический рентгеновский источник, основанный на дифракции реальных и виртуальных фотонов в кристаллах //Известия вузов. Физика, 2007 - т. 50, - № 10/3. - с. 139-146
11. Vagner A.R., Potylitsyn A.P., Kuznetsov S.I., Uglov S.R., Zabaev V.N., Razin S.V. Parametric X-Ray Radiation and Diffraction Bremsstrahlung from Moderately Relativistic Electrons in Pyrolytic Graphite Crystal //Nuclear Physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine-2007: American Institute of Physics Conference Proceedings - Prague, Czech Republic, July 8-19, 2007. - New York: American Institute of Physics (API), 2007 - т. 958. - p. 250-252
12. Wagner A.R., Kuznetsov S.I., Potylitsyn A.P., Razin S.V., Uglov S.R., Zabaev V.N. Monochromatic X-ray sources based on a mechanism of real and virtual photon diffraction in crystals //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B., 2008 - v. 226. 17- P. 3893
13. A.P. Potylitsyn, Yu. A. Popov, A.V. Vukolov, I.V. Zaitsev, A.R. Wagner, V.N. Zabaev. The comparison of monochromatic X-ray sources based on X-ray tube and 5 MeV microtron for possible application in medicine// Proceedings of the RUPAC 2008, Zvenigorod, Russia (September 2008) <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/r08/papers/WEAAU03.pdf>

## **Тезисы докладов, опубликованные по теме диссертации:**

14. Kashkovskiy V.V., Potylitsyn A.P., Wagner A.R. The use of betatron gamma-beam for digital radiographic technique //Abstracts of XXth Russian conference on charged particle accelerators - Novosibirsk, Russia, 10-14 September 2006. - Novosibirsk: BINP, 2006. - P. 106

15. Вагнер А.Р., Забаев В.Н., Кузнецов С.И., Потылицын А.П., Разин С.В. Дифракция виртуальных и реальных фотонов в кристаллах при их генерации пучком 5,7 МэВ электронов //Тезисы докладов V конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям - Харьков, 26 февраля-2 марта 2007. - Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007. - с. 97

16. Забаев В.Н., Разин С.В., Углов С.Р., Кузнецов С.И., Потылицын А.П., Вагнер А.Р. Источник рентгеновского излучения на основе механизма дифракции тормозного излучения пучка микротрона в кристалле //Физико-технические проблемы атомной энергетики: Сборник тезисов докладов IV Международной научно-практической конференции - Томск, 7-8 июня 2007. - Томск: ТПУ, 2007. - с. 38

17. Zabaev V.N., Razin S.V., Uglov S.R., Gogolev A.S., Potylitsyn A.P., Vagner A.R. MONOCHROMATIC X-RAY SOURCES BASED ON MECHANISM OF REAL AND VIRTUAL PHOTON DIFFRACTION IN CRYSTALS //International Symposium «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» (RREPS-07): Book of Abstracts - Prague, Czech Republic, September 24-28, 2007. - Prague: Czech Technical University, 2007. - P. 20

18. Gogolev A.S., Kuznetsov S.I., Potylitsyn A.P., Popov Yu.A., Uglov S.R., Vukolov A.V., Wagner A.R., Zabaev V.N., Zaitsev I.V. The comparison of monochromatic X-ray sources based on X-ray tube and 5 MeV microtron //3rd International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena (Channeling - 2008): Book of abstracts - Erice, Italy, October 25-November 1, 2008. - Erice, Italy: INFN, 2008. - P. 118

19. Вагнер А.Р., Потылицын А.П., Попов Ю.А., Вуколов А.В., Зайцев И.В., Забаев В.Н. Сравнение источников монохроматического рентгеновского излучения, основанных на рентгеновской трубке и микротроне //Научная сессия МИФИ-2009: Аннотации докладов - Москва, 26-30 января 2009. - Москва: МИФИ, 2009 - т. 1. - с. 128