Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт	Физико-технический
Направление подготовки	Физика конденсированного вещества
Кафедра	Общей физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ Тема работы

Определение размера фокусного пятна высокоэнергетической томографической системы на основе бетатрона

УДК

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ41	Генцельман Валентин Гугович		

Руководитель

профессор

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Зав. лаб. №42, ИНК	Рычков М. М.	К.Т.Н.		
ППУ				

консультанты:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Федорчук Ю.М.

1 1	1 11	11	1 11 1		
Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата	
		звание			
доцент	Черепанова Н.В.	к.ф.н.			
По разделу «Социальная ответственность»					
Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата	
		звание			

Д.Т.Н.

ЛОПУСТИТЬ К ЗАШИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата	
		звание			
ΟΦ	Лидер А. М.	к.фм. н.			

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ 03.04.02 ФИЗИКА/ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА, КВАЛИФИКАЦИЯ – МАГИСТР

Код	Результат обучения			
резуль	(компетенции выпускника)			
-тата				
	Общекультурные компетенции			
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию			
	информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию,			
	повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и			
	средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как			
	средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных			
	компьютерных сетях.			
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь;			
	критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития			
	достоинств и устранения недостатков.			
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых			
	коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать			
	организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них			
	ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных			
	подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как			
	объекта управления.			
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать			
	основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении			
	социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы;			
	осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к			
	выполнению профессиональной деятельности.			
P5	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком,			
	позволяющим разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной			
	деятельности.			
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов			
	физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической			
	подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.			
Профес	и фессиональные компетенции			
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности,			
	применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и			
	экспериментального исследования.			
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных			
	последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и			

	радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за
	соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил
	производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны
	труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации
	стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным
	документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического
	оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов
	исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и
	значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности
	и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной
	безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии
	с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования;
	разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных
	проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического
	обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению
	технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов,
	установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и
	программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов
	приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к
	использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке
	инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок,
	материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования
	приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов
	исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к
	составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований
	и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе
	стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и
	организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую
	информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные
	компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по
	стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов,
	оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению
	описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов
	деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-
	энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных,

	нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении техниче	еских,
	технологических и медицинских проблем.	

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физико-технический институт Направление подготовки – Физика Кафедра общей физики

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

Лидер А. М.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
0БМ41	Генцельман Валентин Гуговичу

Тема работы:

Определение размера фокусного пятна высокоэнергетической томографической системы на основе бетатрона от 10.06.2016 г. № 3792/с Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования является определение
(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).	действительного размера фокусного пятна бетатрона с энергией ускоренных электронов 3,5 МэВ.

Перечень подлежащих иссле	дованию.	Провести аналитический обзор литературы в
проектированию и разработь	ke si	области методов определения размеров фокусного
вопросов	-	пятна: проведение надлежащих процелую лля
ВОПРОСОВ (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).		определения параметров установки, влияющих на размер фокусного пятна.
Консультанты по (с указанием разделов)	разделам 1	выпускной квалификационной работы
Раздел		Консультант
Финансовый менеджмент,		черспанова паталья Владимировна
ресурсозффективноств и ресурсосбережение		
Социальная ответственность		Федорчук Юрий Митрофанович
Приложение А		Ермакова Янина Викторовна
Названия разделов, которь языках:	іе должны	ы быть написаны на русском и иностранном

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Зав. каф.	Лидер А. М.	к.фм. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ41	Генцельман В. Г.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:	
Группа	ФИО
0БМ41	Генцельман Валентин Гуговичу

Институт	ФТИ	Кафедра	Общей физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Физика конденсированного
			состояния вещества

Исходные данные к разделу «Финансовы	й менеджмент, ресурсоэффективность и
ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	 Стоимость материалов. Заработная плата руководителя проекта. Заработная плата исполнителей проекта.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	1. Нормы рабочего времени, выполнения проекта
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	 Ставка налога отчисления во внебюджетные фонды. Процент дополнительной заработной платы.
Перечень вопросов, подлежащих исследова	анию, проектированию и разработке:
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	1. Планирование работ в течении осуществления проекта.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	1. Планирование и расчет бюджета научной- исследовательской работы.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	1. Определение эффективности и перспектив научного исследования.
Перечень графического материала (с точным у	казанием обязательных чертежей)
 Анализ конкурентоспособности технологии График проведения и бюджет НИ Оиенка ресурсной, финансовой и экономической эффект 	пивности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая	Подпись	Дата
		степень, звание		
доцент	Черепанова Н.В.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ41	Генцельман В. Г.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Уровень образования

Группа		ФИО		
0БМ41	I	Генцельман Валентин Гуговичу		
Институт	Физико-технический	Кафелла	Общей физики	

Направление/специальность

Магистратура

1. Описание рабочего места (рабочей зоны	Рабочее место находится на кафедре ИНК
технологического проиесса, механического оборудования)	ТПУ в учебном корпусе № 18.
на предмет возникновения:	
 вредных проявлений факторов производственной среды 	– Вредные факторы:
(метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы,	– электромагнитное излучение
вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие	– ионизирующие излучение
излучения)	– микроклимат
 опасных проявлений факторов производственной 	– освещенность
среды (механической природы, термического	Опасные факторы:
характера, электрической, пожарной и взрывной природы)	 электрический ток
 негативного воздействия на окружающую природную 	
среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)	
— чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного,	
экологического и социального характера)	
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных	– Определение размера фокусного пятна
документов по теме:	высокоэнергетической томографической
	системы на основе бетатрона
Перечень вопросов, подлежащих исследованию,	проектированию и разработке:
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой	Обоснование выявленных вредных факторов
производственной среды в следующей	проектируемой производственной среды в
последовательности:	следующей последовательности:
– физико-химическая природа вредности, её связь с	- электромагнитное излучение
разрабатываемой темой;	- ионизирующие излучение
– действие фактора на организм человека;	- приведение допустимых норм с недоходимои
– приведение допустимых норм с необходимой	соответствующий нормативно-технический
размерностью (со ссылкой на соответствующий	документ);
нормативно-технический документ);	- предлагаемые средства защиты
 предлагаемые средства зашиты 	(сначала коллективной защиты, затем –
(сначала коллективной зашиты, затем –	индивидуальные защитные средства)
индивидуальные защитные средства)	
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой	Обоснование выявленных опасных факторов
произведённой среды в следующей последовательности	проектируемой произведённой среды в
Norannuagina onaguogina (nemoninum, grademag	следующей последовательности:
– мехинические описности (источники, среостви	$-2\eta\rho\nu mn\eta\rho\rho\rho\nu\eta\eta m\rho\nu$
 механические опасности (источники, среостви защиты; 	
 механические опасности (источники, среостви защиты; термические опасности (источники, средства 	- возможность возникновения пожара - Определение степени опасности
 мехинические опасности (источники, среостви защиты; термические опасности (источники, средства защиты); 	- возможность возникновения пожара - Определение степени опасности (обоснование)

Физика конденсированного состояния вещества

электричество, молниезащита – источники, средства зашиты)	
– пожароварывобезопасность (причины	
noncupoespoisoocsonachocmo (npusuna),	
профиликтические мероприятия, пербичные сребстви	
З Охрана октужающей спеды:	
sugumu condexemption of arma up amnochemy (aufonocia)	
- инализ возоействия объекти на итмосферу (выоросы), анализ воздействия объекти на итмосферу (выоросы),	- Наличие отходов
– инализ возоеиствия объекти на гиоросферу (соросы),	
– анализ возоеиствия ооъекта на литосферу (отхооы);	- Разработать решения по утилизации
– разработать решения по обеспечению экологической	
оезопасности со ссылками на Н1Д по охране	
окружающей среоы.	
4. Защита в чрезвычаиных ситуациях:	
– перечень возможных ЧС на ооъекте;	
– выбор наиболее типичной ЧС;	– Метеорологические
– разработка превентивных мер по предупреждению	– Диверсия
QC;	 Разработать профилактические меры по
 разработка мер по повышению устойчивости объекта 	устойчивой работе производства
к данной ЧС;	yemou iuoou puoome npousoooemou
 разработка действий в результате возникшей ЧС и 	
мер по ликвидации её последствий	
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения	
безопасности:	
– специальные (характерные для проектируемой рабочей	— Привести перечень ГОСТ СНиПов
зоны) правовые нормы трудового законодательства;	использованных в работе
– организационные мероприятия при компоновке рабочей	
ЗОНЫ	
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические	1. План эвакуации
материалы к расчётному заданию (обязательно для	
специалистов и магистров)	2. План размещения светильников

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Зав.каф.	Федорчук Ю.М.	Д.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	l	ФИО	Подпись	Дата
0БМ41		Генцельман Валентин Гугович		

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт <u>Физико-технический</u> Направление подготовки (специальность) <u>Физика</u> Уровень образования <u>Магистратура</u> Кафедра <u>Общей физики</u> Период выполнения (осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	Обзор литературы	30
	Расчеты и аналитика	30
	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и	15
	ресурсосбережение	
	Социальная ответственность	10
	Приложение на иностранном языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Зав. Каф.	Лидер А. М.	к.ф-м. н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ΟΦ	Лидер А. М.	к.ф-м. н.		

Реферат

Всего 105 страниц, 47 рисунков, 25 таблиц, 30 источников, 54 формулы.

Ключевые слова: компьютерная томография, бетатрон, фокусное пятно, плоскопанельные матричные детекторы, базовое пространственное разрешение, нерезкость изображения.

Объектом исследования является фокусное пятно бетатрона.

Целью работы является исследование возможности применения бетатрона в качестве источника излучения рентгеновской томографии.

Исходя из сформулированной цели, поставлены следующие основные задачи:

1. рассмотреть существующие методики измерения размеров фокусного пятна;

2. выбрать методику, позволяющую наиболее точно определить размер фокусного пятна и измерить эффективный размер фокусного пятна бетатрона;

3. сравнить полученные размеры фокусного пятна с существующими томографическими комлексами.

В процессе исследования проводилось экспериментальное определения размеров фокусного пятна методами щелевой диафрагмы и эталона нерезкости Duplex IQI EN462-5.

В результате исследования установлено, что размеры фокусного пятна изменяются в зависимости от энергии ускоренных электронов.

Полученные данные позволяют проводить оценку и использовать методики, предлагаемые для определения размеров фокусного пятна рентгеновских трубок для высокоэнергетических источников излучения.

Оглавление

Введение15
1 Определение размера фокусного пятна бетатрона 20
1.1 Влияние размера фокусного пятна на нерезкость изображения 25
1.2 Общий принцип работы и устройство бетатрона
1.3 Обзор существующих стандартов 31
1.4 Методы определение размера фокусного пятна при помощи
диафрагмы с отверстием 33
1.5 Методы определение размера фокусного пятна щелевой
диафрагмой 39
1.6 Методы определение размера фокусного пятна методом «Края»44
1.7 Измерение фокусного пятна при помощи эталонов нерезкости
QIQ Duplex
2 Детекторы рентгеновского излучения 56
2.1 Калибровка цифровых детекторных систем
2.2 Коррекция «плохих» пикселей 64
2.3 Основные параметры качества изображения 64
3 Практическая часть 67
3.1 Определение фокусного пятна при помощи щелевой диафрагмы 69
3.2 Определение фокусного пятна при помощи эталона IQI Duplex. 74
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и
ресурсосбережение
4.1 Планирование научно-исследовательских работ
4.2 Бюджет научно-технического исследования

5 Социальная ответственность
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов 90
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней
опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на работающих
5.2.1 Требования к ПЭВМ и организация работы организационные
мероприятия
5.2.2Условия безопасной работы94
5.3 Расчет искусственной освещенности
5.4 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой
производственной среды
5.4.1 Электробезопасность
5/4/2 Пожаровари вобезовасности 100
J.4.2 Пожароварывоосзопасноств 100
5.5 Радиационная безопасность 104
 5.4.2 пожаровзрывоосзопасность
5.4.2 пожаровзрывоосзопасность 100 5.5 Радиационная безопасность 104 5.6 Охрана окружающей среды 107 5.7 Защита в чрезвычайных ситуациях 108
5.4.2 пожаровзрывоосзопасность 100 5.5 Радиационная безопасность 104 5.6 Охрана окружающей среды 107 5.7 Защита в чрезвычайных ситуациях 108 Заключение 111

Определения

В данной работе использованы термины, имеющие следующие определения:

Анод – электрод рентгеновской трубки, присоединенный к положительному полюсу источника питания;

Контрастное разрешение – способность выделять различия между двумя похожими, но не идентичными материалами;

Катод – электрод рентгеновской трубки, присоединенный к отрицательному полюсу источника тока, служит источником электронов;

Пространственное разрешение – способность различать две области отдельных структур на достаточно малом расстоянии друг от друга;

Фокусное пятно – участок анода рентгеновской трубки, на котором происходит генерирование рабочего пучка рентгеновского излучения;

Pinhole – малое отверстие, используемое для получения изображения.

Введение

Современным средством обследования внешней формы и внутренней структуры деталей технических систем является рентгеновская Eë томография (KT). наиболее компьютерная достоинства полно проявляются при неразрушающей диагностике деталей и сборок со сложной внутренней структурой.

Её появление обусловлено недостатками обычной рентгенографии, заключавшего в себе идею получения не одного, а ряда снимков, выполненных под разными ракурсами, и определения по ним путём математической обработки плотностей исследуемого вещества в ряде сечений [1]. Преимуществами КТ по сравнению с традиционной рентгенографией стали:

- отсутствие теневых наложений на изображении;

- более высокая точность измерения геометрических соотношений;

- более высокая чувствительность, на порядок выше, чем при обычной рентгенографии.

Задача реконструкции изображения впервые была рассмотрена в 1917 году австрийским математиком Иоганном Радоном, который вывел зависимости поглощения от плотности вещества на некотором луче зрения. Первую систему реконструкции рентгеновских изображений разработали советские учёные Тетельбаум, Коренблюм и Тютин. С тех времен системы томографического сканирования значительно усовершенствовались в инженерном плане и в зависимости от области применения.

КТ является методом неразрушающего послойного исследования внутренней структуры объекта, основанная на измерении и компьютерной обработке разности ослабления рентгеновского излучения различными по плотности веществами. Была предложена в 1972 году Годфри Хаунсфилдом и Алланом Кормаком [2].

Чаще всего для целей КТ используются рентгеновские трубки с рабочим напряжением до 600 кВ. Большую сложность для обычных рентгеновских трубок представляют изделия с произведением плотности на толщину порядка от 40 до 120 г/см² [3]. Для решения этой проблемы требуется более высокоэнергетический источник рентгеновского излучения. В настоящее время среди серийно выпускаемых приборов на эту роль могут претендовать линейные ускорители, бетатроны и микротроны.

Сегодня уже более десятка фирм из разных стран предлагают промышленные компьютерные томографы самых разнообразных моделей [4]. В США следует отметить фирму North Star Imaging и ее подразделение X-View CT, выпускающие промышленные томографы серий X-CT, eXpress-CT и CXMM, а также фирму Varian Medical, предлагающую несколько моделей промышленных томографов серии BIR и InspeCT.

В Японии промышленные томографы разрабатывают фирмы Toshiba IT & Control Systems, Hitachi, Shimadzu и Saki.

В Европе предложения томографического оборудования чрезвычайно разнообразны: немецкая фирма Phoenix x-ray (купленная американской фирмой GE, отделение GE Measurement & Control Solutions) предлагает множество моделей томографов, в том числе серии vltomelx; немецкая фирма YXLON International(объединившаяся с фирмой Feinfocus и входящая в группу Comet) предлагает 4 модели томографов серии Y.CT; английская фирма X-Tek Systems (купленная ранее бельгийской фирмой Metris, а затем Nikon Metrology) предлагает несколько моделей томографов серии XT; немецкая фирма RayScan Technologies (входящая в группу BELT) производит ряд промышленных томографов серии RayScan. В России - многолетний промышленных производитель И экспортер томографов фирма ПРОМИНТРО – предлагает 4 модели промышленных томографов серии ВТ.

При выборе среди многообразия томографических комплексов следует выделить основные технические характеристики [5]:

диаметр, длина и масса ОК;

– энергия источника излучения, определяющая проникающую способность;

предел пространственного разрешения внутри ОК;

формат и качество томограмм ОК, наиболее значимых для покупателя;

- чувствительность к локальным дефектам и разноплотностям;

точность измерения размеров внутри ОК;

- производительность;

 надежность оборудования и наличие оперативной технической и методической поддержки в процессе многолетней эксплуатации оборудования;

средства радиационной защиты;

- цена.

По сравнению с линейными ускорителями, бетатроны имею ряд преимуществ. Конструкция бетатрона имеет малый вес, компактность, мобильность, работоспособность при произвольной ориентации в пространстве, отсутствие необходимости в сложной системе охлаждения. Высокая точность взаимного позиционирования бетатрона и приемника излучения в пространстве с помощью промышленных роботов позволяет реализовать любые схемы просвечивания объекта контроля (ОК) в автоматическом режиме.

Возможность произвольно и быстро с высокой точностью менять взаимное положение ускорителя и приемника в пространстве позволяет реализовать процесс НК при переходе от одной модели ОК к другой лишь переключением программ на пульте оператора. При появлении новой модели ОК для процедуры НК потребуется лишь перепрограммирование роботов и режимов работы ускорителя.

Точность позиционирования и произвольность пространственной ориентации бетатрона и приемника позволяет проводить НК путем сканирования с применением линейных приемников излучения, экспонированием на пленку или планшетный приемник излучения без дополнительного оборудования программным путем.

Разница в длительности экспозиции при использовании бетатрона и линейного ускорителя (вследствие существенно более высокой плотности потока фотонов у линейного ускорителя), проявляется заметно лишь при экстремальных толщинах стали (более 200 мм).

Применение бетатрона не требует создания системы принудительной вентиляции испытательной камеры и соблюдения интервалов (запретное время) между НК отдельных объектов контроля, что существенно снижает время НК. Замена отработавших ресурс узлов бетатрона (камера) может быть осуществлено специалистами предприятия, использующего ускоритель в течение 30 минут в рабочее время. Разница в цене бетатрона и линейного ускорителя такова, что стоимость одного линейного ускорителя близка к стоимости всего автоматизированного радиографического комплекса на основе бетатрона и высокоточных промышленных роботов.

Большинство из выпускаемых серийно промышленных томографов на базе линейных ускорителей не удовлетворяют потребности рынка. Решающим в данном случае становится пространственное разрешение томограмм. Эта характеристика определяет качество контроля. В свою очередь пространственная разрешающая способность зависит от размера фокусного пятна.

Размер фокусного пятна является ключевым параметром любого источника излучения, как для томографии, так и для радиографии. Чем меньше размеры фокусного пятна, тем лучше изображение просвечиваемых изделий, тем выше чувствительность, то есть тем более мелкие дефекты можно обнаружить с помощью данного источника излучения.

Для решения задач НК применяются источники излучения с различными размерами фокусного пятна. Следует различать микрофокусные (от 1 до 100 микрон) и минифокусные (от 0,1 до 0,5 мм) размеры пятна. В настоящее время ширина фокусного пятна бетатрона составляет 0,2 мм. В

данном направлении, бетатрон имеет хорошие перспективы, т. к. размеры его фокусного пятна весьма малы. Для успешной конкуренции с линейными ускорителями в данном секторе требуется изучение его характеристики, а именно, размера фокусного пятна.

1 Определение размера фокусного пятна бетатрона

Промышленная рентгеновская вычислительная томография (ПРВТ) относится к радиационному методу неразрушающего контроля (РНК) [6]. В состав любого рентгеновского томографа входят следующие основные блоки [7]:

- источник рентгеновского излучения;
- система перемещения объекта контроля;
- детектор рентгеновского излучения;
- вычислительная система и система управления;
- набор программного обеспечения.

В ПРВТ используется схема, характерная для остальных типов РНК: рентгеновское излучение, генерируемое источником, проходит через (ОК) и фиксируется детектором. При этом его интенсивность падает согласно закону (1.1).

$$I = I_0 e^{-\int_0^L \mu(x, y, z) dl}$$
(1.1)

Где $\mu(x,y,z)$ – ограниченное по протяжённости распределение линейного коэффициента ослабления, I₀ – интенсивность излучения, которую зафиксировал бы детектор при отсутствии ОК. Интеграл вычисляется вдоль прямой, соединяющей источник и детектор излучения, L – расстояние между источником и детектором [6]. Восстановление внутренней и внешней структуры объекта равнозначно восстановлению закона распределения $\mu(x,y,z)$, которое возможно с помощью различных алгоритмов [6,7].

Для того чтобы получить изображение приемлемого качества, необходимо измерить достаточно большое количество интегральных значений ослабления (проекций) [7]. Для получения достаточного набора проекционных данных применяются различные схемы томографа, выбор которой зависит как от требований контроля (разрешающая способность, скорость контроля, габариты ОК), так и от характеристик источника и детектора излучения.

Предметной областью данной работы являются источники излучения, используемые для томографии. Именно источник излучения практически полностью задаёт метрологические характеристики томографической системы [6]. В наибольшей мере это относится к ПРВТ, где ограничение излучения не является ключевым параметром, в дозы отличие OT медицинских приложений метода. Поэтому диапазон мощности источников излучения для контроля промышленных объектов значительно шире, чем у медицинских диагностических приборов.

ПРВТ применяется для контроля, как микрообъектов, так и крупных строительных конструкций. Диапазон энергий, используемых для контроля промышленных объектов можно разделить на три области: от единиц кэВ до 100 кэВ, от 100 кэВ до 1 МэВ, от 1 МэВ [6]. Наименее изученным и проработанным является высокоэнергетический диапазон, именно тот диапазон, где применение классических рентгеновских трубок становится невозможным.

Основным ограничением является проникающая способность рентгеновского излучения. Если для просвечивания объекта из стали толщиной 50 мм требуется энергия 500 кэВ, то для 20 см стали необходимы кванты с энергией 15 МэВ [4]. Диапазон энергий до 450 кэВ покрывается промышленно производимыми рентгеновскими трубками. Для получения больших энергий требуется другой метод получения тормозного излучения. Исторически для этого применялись крупногабаритные ускорители прямого действия, затем их сменили линейные и циклические ускорители [8].

И так, в диапазоне высоких энергий в качестве источников излучения применяются малогабаритные ускорители заряженных частиц. Наиболее распространены в этой области линейные ускорители и бетатроны. В справочнике [6] упоминается так же о возможности использования микротронов и синхротронного излучения. Использование синхротронного излучения и рентгеновских лазеров на свободных электронных на данном этапе развития его источников невозможно для тяжелых промышленных

объектов из-за низкой энергии квантов: до 50 кэВ [4]. Основной областью применения синхротронного излучения остаётся микробиология и медицина. Стоит также учитывать огромные размеры и стоимость установок для генерации такого излучения.

На данный момент развитие источников излучения для ПРВТ заметно отстаёт от развития цифровых технологий детектирования. В последние годы практически не улучшается предел пространственного разрешения томограмм, как и не увеличивается максимально возможный размер объектов контроля [9]. Причина этому – недостаточно малый размер фокусного пятна малогабаритных ускорителей. Этот параметр долгое время не улучшался, так же как и не появлялись в последние годы принципиально новые источники с малым размером фокусного пятна.

В неразрушающем контроле и медицинской технике фокусным пятном называют область анода рентгеновской трубки, в которой происходит генерация тормозного излучения. В бетатроне фокусным пятном является участок мишени, на который при смешении с равновесной орбиты попадают ускоренные электроны и, который является источником тормозного излучения. Различают действительные и эффективные фокусные пятна.

Действительное фокусное пятно – сечение, в котором анод рентгеновской трубки пересекается электронным потоком.

Линейное фокусное пятно – действительное фокусное пятно резко выраженной прямоугольной формы, для которого характерно максимальное распределение интенсивности излучения вблизи центра прямоугольника

Эффективное фокусное пятно – проекция действительного фокусного пятна на плоскость, перпендикулярную выбранному направлению. Обычно это направление совпадает с направлением центрального луча, то есть луча, выходящего из центра фокусного пятна через центр выходного окна.

Наиболее известной компанией на рынке, выпускающей высокоэнергетические томографические комплексы является российская компания ООО «ПРОМИНТРО». В качестве источников излучения

предлагается рентгеновский аппарат, линейный ускоритель и бетатрон. Сравнительные характеристики источников представлены в таблице 1.

Источник	Максимальн	Размеры	Пространственн	Максимальная
излучения	ая энергия	фокусного	ое разрешение	контролируемая
	квантов,	пятна, мм х мм	пар линий/мм	толщина по стали
	МэВ			ММ
Рентгеновский				
аппарат Isovolt	0,45	0,8 x 1	3	50
450 HS, Seifert				
Линейный				
ускоритель	2	2 x 2	1	100
Linatron 200A,	2		1	100
Varion				
Бетатрон	5	0.2 x 2	5	160
МИБ-5, ТПУ	5	0,2 X 2	5	100

Таблица 1 – Параметры источников излучения используемых в томографе BT-500XA

Сравнение данных таблицы показывает, что бетатрон обеспечивает лучшие характеристики по толщине контролируемого объекта и пространственному разрешению [10].

В статье [4] проводится обзор современного состояния источников излучения для ПРВТ, среди недостатков доступных на рынке линейных ускорителей упоминается нестабильность интенсивности излучения и размер фокусного пятна порядка 2 мм, вместо требуемых 0,4...0,2 мм.

разрешения (ППР) – внутри ОК, Предел пространственного выраженный в пер/см или "парах линий" на см - важнейшая информационная характеристика компьютерного томографа [5]. Равноценно указание "нерезкости" в виде ширины функции рассеяния "по уровню 0,5" (величина, ППР зависит от многих факторов, таких как размер обратная ППР). фокусного пятна, интервала между детектирующими элементами, контроля, формата, алгоритма свертки, точности положение объекта механизмов системы, жесткости механики и др.

В таблице 2 приведены уровни пространственного разрешения и формат реконструируемых томограмм существующих томографических систем.

Таблица 2 –	Уровни пространственного	разрешения	И	формат
реконструируемых	томограмм			

Зарубежные		Отечественные			
Марка	Уровень	Формат	Марка	Уровень	Формат
томографа	ППР,	томограммы	томографа	ΠΠΡ,	томограммы
	пер/см			пер/см	
Mx8000Dual	24	1024x1024	BT-1200	10	512x512
SomatomPlus 4	5	512x512	BT-800	30	1024x1024
AsteionMulti	4	512x512	BT-600XA	50(100)	2048x2048
HiSpeed NX/i	7	512x512	BT-500	30(50)	1024x1024
BIR600/450	25	2048x2048	BT-50	200	512x512

Для достаточно крупных ОК диаметром 500 мм практически выполнимо расположение центра вращения примерно посередине расстояния от фокусного пятна до детектора, что соответствует "увеличению" порядка 2. При этом требуется ширина зоны детектирования более 1 м (в 2 раза шире OK) с шагом менее ширины функции рассеяния и таким же фокусным пятном, а размер пикселя реконструируемой томограммы должен быть меньше 0,5 ширины функции рассеяния. Например (для простоты пересчета), ППР такого томографа в 25 пер/см (0,4 мм) требует ширины фокусного пятна < 0,8 мм, размера пикселя томограммы < 0,2 мм и решетки детекторов с шагом < 0,4 мм на длине 1 м.

Достижение ППР в 50 пер/см (0,2 мм) требует ширины фокусного пятна < 0,4 мм, размера пикселя томограммы < 0,1 мм и решетки детекторов с шагом < 0,2 мм. Для 100 пер/см требования еще жестче в 2 раза. Отсюда, в частности, видно, что для достижения универсальным томографом ППР на уровне 50...100 пер/см не пригодны традиционные фокусные пятна в 2...0,8 мм, а необходимы высокоэнергетические источники (трубки и ускорители) с шириной фокусного пятна на уровне 0,4...0,2 мм. Такие условия обеспечены в томографе ВТ-600ХА (ППР до 100 пер/см), у которого помимо отпаянных

минифокусных высокоэнергетических источников (на 450 кВ и 5 МэВ) применены дополнительные управляемые коллиматоры, устраняющие влияние афокального излучения и уменьшающие эффективную ширину фокусного пятна до 0,3 и 0,15 мм.

Для сравнения - уровень ППР низкоэнергетических (от 80 до 130 кВ) медицинских рентгеновских томографов с максимальным рабочим полем диаметром 500 мм составляет 13...25 (50) пер/см при ширине фокусного пятна рентгеновских трубок 0,8...0,4 мм и формате томограмм 512х512.

1.1 Влияние размера фокусного пятна на нерезкость изображения

Геометрическая нерезкость μ_g обусловлена нерезкостью изображения, связанной с наличием полутени от источника излучения конечных размеров [11]. Используя рис. 1, степень размытости изображения *В* можно записать в виде

$$B = ad_2 / d_1 = a(m-1), \tag{1.2}$$

где *a* – эффективный размер фокусного пятна источника, а *m* – увеличение изображения. На практике геометрическую нерезкость удобно вычислять с помощью выражения (1.2), разделив его на *m*. Тогда геометрическая нерезкость запишется следующим образом:

$$\mu_{g} = a(1 - 1/m). \tag{1.3}$$

Для оценки вклада геометрической нерезкости в общую нерезкость изображения необходимо сопоставить ее с другими составляющими. Пренебрегая нерезкостью, вызванной движением тестируемого объекта нерезкость, обусловленную характеристиками приемника, как μ_t , полную нерезкость изображения можно записать в виде

$$\mu = (\mu_g^2 + \mu_t^2)^{1/2}.$$
(1.4)

ИЛИ

$$\mu = F \left[1/m^2 + (1 - 1/m)^2 a^2 / F^2 \right]^{1/2}, \qquad (1.5)$$

где для простоты предполагается, что два вклада в нерезкость суммируются как квадраты, и при выводе формулы (1.5) применяется соотношение

$$\mu_t = F / m. \tag{1.6}$$



Рис. 1. Схема (построенная не в масштабе) с обозначениями, используемая для анализа геометрической нерезкости по формуле (2.6)



Рис. 2. Изменение общей нерезкости с увеличением изображения. Величины нерезкости нормированы на нерезкость приемника *F*. Кривые, помеченные цифрами 0, 1, 2, 4, 8, построены для размеров фокусного пятна 0, *F*, 2*F*, 4*F* и 8*F* соответственно.

F обозначает собственную нерезкость приемника, которая имелась бы при нулевой толщине объекта и непосредственном контакте приемника с объектом.

Из выражения (1.5) можно видеть, что, если геометрическая нерезкость намного меньше нерезкости, обусловленной приемником, общая нерезкость будет обратно пропорциональна увеличению изображения; таким образом, увеличение в рентгенографии будет приводить к уменьшению общей изображении. Напротив, нерезкости В если нерезкость, вносимая приемником, значительно превышает геометрическую нерезкость, то общая нерезкость будет возрастать пропорционально увеличению изображения, что и показано на рис. 2, дающем представление о зависимости величины U/F от увеличения. Каждая кривая на рисунке соответствует различным значениям отношения a/F. Видно, что при значениях a/F меньше, чем приблизительно 2, рентгенография с увеличением будет давать уменьшенную нерезкость, а при значениях, больших 2, – увеличенную. Из анализа этих кривых можно сделать следующие выводы:

а) В общей рентгенографии при значениях a/F > 2 общая нерезкость будет расти пропорционально увеличению изображения. Тестовый объект необходимо располагать как можно ближе к приемнику, а расстояние между фокусом и приемником должно быть по возможности очень большим.

б) Для рентгенографии с увеличением при a/F < 2 общая нерезкость будет уменьшаться с ростом увеличения изображения в диапазоне от малого до умеренного увеличений, а затем будет увеличиваться. Заметное снижение нерезкости возможно только в случае введения соответствующего увеличения изображения.

Если размеры фокусного пятна равны 0,6 и 1,0 *мм*, тогда как нерезкость, обусловленная использованием детектора на основе рентгеновской пленки, может быть порядка 0,1–0,2 *мм*. Данное устройство удовлетворяет условию a/F > 2, поэтому общая нерезкость будет определяться размерами фокусного пятна и конфигурацией системы. В методе рентгенографии с увеличением используется фокусное пятно очень малых размеров.

1.2 Общий принцип работы и устройство бетатрона

Бетатрон – индукционный циклический ускоритель электронов является одним из первых высокоэнергетических источников тормозного излучения, который начал применяться в промышленной дефектоскопии.

Принцип действия бетатрона заключается в следующем. Электроны, инжектируемые в вакуумную камеру, ускоряются под действием вихревого электрического поля, создаваемого переменным магнитным потоком, который, в свою очередь, создается с помощью специальной системы электромагнитов. При этом в течение всего цикла ускорения электроны движутся по круговой орбите постоянного радиуса, плоскость которой перпендикулярна к оси симметрии магнитного поля. Для сохранения постоянства радиуса орбиты, по которой движутся электроны в процессе ускорения, необходимо, чтобы скорость нарастания энергии электрона равнялась скорости нарастания величины магнитного поля [12]. Запишем несколько простых формул. Обозначим через R радиус окружности, электронами Величина описываемой В ведущем магнитном поле. вихревого электрического поля связана со ускоряющего скоростью магнитного потока Φ , пронизывающего эту изменения окружность, формулой

$$E = -\frac{1}{2\pi R} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \qquad (1.7)$$

где $\Delta \Phi$ – изменение потока Φ за время Δt . Сила, действующая на электрон, равна (опустим знак минус, т. к. не представляет интереса)

$$F = eB = \frac{e}{2\pi R} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$
 (1.8)

Умножим равенство на Δt и заметим, что произведение $F\Delta t$ представляет собой приращение импульса силы, ускоряющей электрон; оно равно, следовательно, приращению его импульса

$$\Delta p = \frac{e}{2\pi R} \Delta \Phi. \tag{1.9}$$

Если в начале цикла ускорения, как импульс электронов, так и магнитный поток равнялись нулю, то из этого равенства сразу следует, что

$$p = \frac{e}{2\pi R}\Phi.$$
 (1.10)

Связь между ведущим магнитным полем *В_{вед}* и импульсом электрона задается формулой

$$p = eB_{Beo}R. \tag{1.11}$$

Сравнивая (1.10) и (1.11), найдем

$$Bsed = -\frac{1}{2}\frac{\Phi}{\pi R^2},\tag{1.12}$$

Величина $\Phi/\pi R^2$ равна отношению магнитного потока, пронизывающего орбиту, к площади этой орбиты, т е. Среднему значению B_{cp} магнитного поля, пронизывающего орбиту. Имеем, следовательно:

$$Bsed = -\frac{1}{2}B_{cp}.$$
 (1.13)

Это соотношение и определяет условие правильной работы бетатрона.

В современных бетатронах индукция магнитного поля на средней линии достигает величины порядка 0,345-0,43 Тл. Для достижения конечной энергии несколько миллионов электрон-вольт электроны в процессе ускорения должны совершить по равновесной орбите более миллиона оборотов. Для обеспечения устойчивого движения электронного пучка в процессе всего цикла ускорения напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита в плоскости орбиты убывает от центра орбиты к периферии. Такое пространственное распределение магнитного поля в области равновесной орбиты вызывает появление фокусирующих сил при отклонении электронов от равновесной орбиты (например, вследствие

соударения электронов с молекулами воздуха), которые заставляют электроны автоматически возвращаться на равновесную орбиту. По окончании цикла ускорения электроны с помощью специальных устройств смещаются с равновесной орбиты и попадают на мишень, где генерируется тормозное излучение.

Индукционный ускоритель обычно состоит из электромагнита, блока питания, ускорительной камеры, размещенной в межполюсном пространстве. Инжектор установлен в одном из патрубков вакуумной ускорительной камеры. Схема инжекции размещается в отдельном блоке или непосредственно на электромагните бетатрона под облицовочным кожухом. Пульт управления бетатроном выполняется в виде отдельного блока.

B бетатроне применяют электромагнит, который состоит ИЗ магнитопровода Ш-образного многостоечного или броневого типа, полюсов, между которыми размещается кольцевая вакуумная камера, и центральных вкладышей. Центральные вкладыши И магнитопровод полюсов изготавливают из трансформаторной стали. Полюсы электромагнита имеют обычно форму цилиндров. Питание электромагнита бетатрона производят от промышленной сети переменного тока частотой 50 Ги или от источника питания, генерирующего напряжение более высокой частоты.

Ускорение вакуумной электронов происходит В камере, изготавливаемой из стекла или фарфора и имеющей тороидальную форму. Она может быть отпаянной или работать при непрерывной откачке. Для нормальной работы бетатрона давление остаточного газа в вакуумной камере должно быть не выше $10^4 \Pi a$. Повышение давления приводит к уменьшению числа частиц, достигших конца ускорения. Во избежание образования поверхностного заряда на стенках камеры вследствие оседания части ускоряемого электронного пучка поверхность камеры покрывают проводящим слоем сопротивлением 30-100 Ом и заземляют. В одном из патрубков камеры устанавливается инжектор электронов, а в другом – тормозная мишень и газопоглотитель Инжектор расположен в плоскости 30

равновесной орбиты у наружной стенки камеры, а мишень находится по другую сторону орбиты – у внутренней стенки. В процессе ускорения амплитуда поперечных колебаний электронов относительно равновесной орбиты затухает, и электронный пучок на мишени имеет небольшие поперечные размеры Поток образующегося тормозного излучения выходит из камеры через ее стенки. В качестве инжектора в бетатронах используют высоковольтные электронные источники.

В качестве катодов применяют оксидно-ториевые прямоканальные катоды, имеющие вольфрамовый или танталовый керн или катоды из чистого вольфрама. Первые имеют высокую удельную эмиссию, легко активируются и малочувствительны к отравлению, но менее долговечны, чем катоды из вольфрама, которые менее эффективны. Сам катод изготавливают в виде винтовой спирали. При подаче на катод отрицательного импульса высокого напряжения длительностью несколько микросекунд осуществляется инжекция электронов в вакуумную камеру.

Необходимая фокусировка инжектируемых электронов достигается подбором потенциала фокусирующего электрода и глубиной посадки в нем катода. Анод инжектора заземляют, чтобы он не влиял на орбитальное движение частиц [13].

1.3 Обзор существующих стандартов

На сегодняшний день существует несколько стандартов для определения размера фокусного пятна:

EN 12543 – характеристики фокусного пятна промышленных рентгеновских источников для использования в неразрушающем контроле. Состоит из пяти частей:

1) Метод сканирования;

2) «Pinhole»-камера;

3) Щелевая камера;

4) Метод края;

5) Измерение эффективного фокусного пятна для мини/микро фокуса рентгеновских трубок.

ASTM E1165 – стандарт для измерения размера фокусного пятна промышленных рентгеновских источников методом «Pinhole Imaging».

IEC 60336 – характеристики фокусных пятен для рентгеновских аппаратов медицинского назначения (щелевая камера, pinhole, мира в виде звезды).

ASTM E2903-13 – метод измерения эффективного размера фокусного пятна мини и микро фокуса рентгеновской трубки.

ГОСТ 22091.9-86 определяет методы измерения размеров фокусного пятна для рентгеновских трубок [14,15].

Согласно [16] разные методы приводят к различным результатам для одних и тех же источников. Более того, один стандарт может давать разный результат при использовании различных настроек.

Данные методы в основном используется для определения размеров фокусных пятен рентгеновских трубок с энергией до 500 кэВ. В следствии применения источников излучения более 1 МэВ, тестовые объекты (щелевые диафрагмы, измерительные сетки и т.д.), становятся проницаемыми для квантов с энергией в несколько МэВ, что делает непригодным использование данного метода для определения размера фокусного пятна бетатрона.

По видам тестовых объектов, используемых для измерения, методики условно можно разделить на следующие группы:

1) с использованием диафрагмы (коллиматора) с отверстием;

2) с использованием щелевой диафрагмы (коллиматора).

В зарубежных стандартах так же описывается Edge-метод (метод «Края»).

1.4 Методы определение размера фокусного пятна при помощи диафрагмы с отверстием

К данным методам относятся стандарты [17,18,19] для измерения размеров фокусного пятна в качестве тестового объекта используется «Pinhole»-камера (диафрагма с отверстием). Размеры отверстия задаются стандартом и зависят от размера фокусного пятна.

Метод, описываемый в стандарте [15] применяется для измерения размеров фокусного пятна от 0,1 до 5 *мм*. Размеры отверстия также задаются стандартом и колеблются в пределах от 0,01 до 0,3 *мм* в зависимости от предполагаемых размеров фокусного пятна.

В стандарте [17] в качестве тестового объекта используется «Pinhole»камера, которая состоит из диафрагмы с точечным отверстием, имеющим размеры, приведенные в таблице 3 в зависимости от фактического размера фокусного пятна. Размеры *P* и *H* приведены на рис. 3.

$$F = \frac{a}{b}f - d\left(1 + \frac{a}{b}\right),\tag{1.14}$$

Таблица 3 – Размеры отверстия «Pinhole»-камеры в зависимости от размера фокусного пятна

Размер фокального пятна, мм	Диаметр <i>Р</i> , мкм	Высота Н, мкм
от 0,2 до 1,0	30 ± 5	75 ± 5
> 1,0	100 ± 5	500 ± 5



Рис. 3. Основные размеры «Pinhole»-камеры: 1 – фокальное пятно

«Pinhole»-камера может быть изготовлена из вольфрама или подобного материала. Угол между направлением луча и осью отверстия (рис. 4) должен быть меньше 3°.



Рис. 4. «Pinhole»-камера: 1 – фокусное пятно; 2 – направление рентгеновского луча; 3 – максимальное отклонение от оси «Pinhole»-камеры

Диафрагма «Pinhole»-камеры должна быть расположена на расстоянии m от фокусного пятна, так что изменение увеличения над расширением фактического фокусного пятна не превышало \pm 5% в направлении пучка. Это расстояние недолжно быть не менее 100 *мм*. Рентгенографические детектор изображения должен быть помещен перпендикулярно к направлению пучка на расстоянии n от диафрагмы «Pinhole»-камеры, определяемого из соответствующего увеличения в соответствии с рис. 5 и таблицей 4.



Рис. 5. Размеры и плоскости в направлении пучка: 1 – плоскость анода; 2 – плоскость начала отсчёта; 3 – рентгенографический детектор изображения; 4 – увеличение длины эффективного фокусного пятна; 5 – направление пучка; 6 – входную поверхность диафрагмы; 7 – физическая длина фактического фокального пятна

Tuomiqu . Gubiioninio et b y berni ter	
Размер фокального пятна d, мм	Минимальное увеличение <i>n/m</i>
от 0,2 до 2,0	3:1
> 2,0	2:1

Таблица 4 – Зависимость увеличения от размера фокусного пятна

Максимально допустимая нерезкость детектора задается геометрической нерезкость μ_G «Pinhole»-камеры и рассчитывается по формуле:

$$\mu_{G} = P(1 + n/m). \tag{1.15}$$

Нерезкость детектор должна определяться с помощью двойной проволочной пары QIQ в соответствии со стандартом EN 462-5. Для правильной количественной оценки измерений минимальная длина и ширина фокального пятна изображения должны покрывать область, по крайней мере, 20 пикселей детектора. Отношение сигнал-шум фокального пятна изображения (отношение максимального значения интенсивности внутри фокального пятна и стандартного отклонения от фонового сигнала за пределами) должно быть не менее 50 пикселей. Максимум интенсивности внутри фокального пятна должна быть выше 50 %, но меньше, чем 100% от максимального выходного значения детектора, для достижения изображения с хорошим контрастом.

Изображение шкалы серого детектора излучения должна быть пропорциональна дозе рентгеновских лучей. Для определения области фокусного пятна (рис. 6) используется площадь всех пикселей полученного фокусного пятна изображения с значениями серого, превышающие 10% от максимального значения интенсивности фона. Размер фокусного пятна определяется степенью фокальной области в х- и у-направлении, деленное на коэффициент увеличения (*n/m*) «Pinhole»-камеры. Визуальная оценка осуществляется с использованием увеличительной линзы при х5 или х10 увеличении с встроенной сеткой, с делениями 0,1 *мм*. Полученное фокусное пятно определяется видимой областью степени почернения, деленной на выбранный коэффициент увеличения.



Рис. 6. Оценка фокусного пятна изображения:

a) Изображение шкалы серого, которое пропорционально дозе рентгеновского излучения;

б) результат оценки (бинарное изображение) на основе 10%-ного порога между интенсивностью фона и максимальной интенсивностью фокального пятна изображения.

Также к данному методу можно отнести монографию [18], где описывается методика определения размеров фокусного пятна на мишени бетатрона. Данный способ реализует метод измерения размеров фокусного пятна при помощи диафрагмы (коллиматора) с отверстием. Излучение от бетатрона направляется на свинцовый объектив, имеющий отверстие диаметром 0,1 *мм*. Через отверстие излучение попадает внутрь свинцовой
камеры, на противоположной стенке которой располагается фотоплёнка. Оптическая схема процесса измерения представлена на рис. 7.

Также отмечается, что представленная схема определения размеров фокусного пятна подходит для большинства работ и дефектоскопии. Геометрические размеры измерительной камеры рассчитывались на основе экспериментальных данных для коэффициента ослабления излучения в свинце для бетатрона данной модели (использовались приборы на энергию 15 *М*э*B* и 25 *М*э*B*).



Рис. 7. Схема установки для измерения размеров фокусного пятна. 1 – мишень в камере бетатрона; 2 – свинцовый объектив; 3 – свинцовый корпус камеры; 4 – фотоплёнка; 5 – подробная схема объектива

Работа [20] является попыткой модифицировать методику [16] определения размеров фокусного пятна низкоэнергетического рентгеновского излучения на основе применения тонкой диафрагмы из высокоплотного материала с высоким атомным номером, имеющей круговую апертуру малого диаметра. Применение такой диафрагмы позволяло получить в детекторе распределение дозы, идентичное распределению квантов в фокусном пятне рентгеновского излучения за счет квантов, прошедших через апертуру без взаимодействия с материалом диафрагмы.

При этом обеспечивалось высокое соотношение между излучением, прошедшим без взаимодействия с материалом диафрагмы, и излучением из материала диафрагмы.

Конструкция специального свинцового объектива (рис. 7) – результат поиска компромиссного решения, т.к. высокая проникающая способность ТИ требовала увеличения толщины диафрагмы, а принцип функционирования вынуждал выполнить апертуру небольшой протяженности с малым диаметром.



Рис 8. Распределение дозы в детекторе (специальный объектив) при модельном распределении квантов на поверхности мишени (рис 8).



Рис 9. Модельное распределение квантов на поверхности мишени при $G_e=0.212$ mm.

Ha рис. 8 приведено распределение дозы в детекторе при моделировании переноса излучения через модельную структуру С контрольным объектом в виде специального объектива, а на рис. 9 модельное распределение квантов в фокусном пятне ТИ на поверхности По мишени, при котором получено распределение дозы в детекторе. распределению дозы в детекторе можно определить только наличие несимметричного фокусного пятна.



Рис 10. Распределение дозы в детекторе и модельное распределение квантов по поверхности мишени вдоль оси Y при X=0.

Рис 11. Распределение дозы в детекторе и модельное распределение квантов по поверхности мишени вдоль оси X при Y=0.

1.0

0.8

0,2

0.0

На рис. 10,11 показаны соответствующие распределения дозы в детекторе и модельные распределения квантов по поверхности мишени по главным осям.

Размытие распределения дозы в детекторе по сравнению с распределением квантов является следствием низкого соотношения между излучением, прошедшим через апертуру объектива на детектор без взаимодействия с материалом объектива, и излучением, испытавшим такое взаимодействие.

Разработчики и пользователи объектива, к сожалению, не приводят методику, которая позволяет определить параметры распределения квантов в фокусном пятне по распределению дозы в детекторе.

1.5 Методы определение размера фокусного пятна щелевой диафрагмой

К данным методам можно отнести стандарты [19, 21, 22]. Одной из важных особенностей применения щелевой диафрагмы является то, что получаемое изображение является результатом операции математической свёртки формы исследуемого объекта и формы отверстия. В случае отверстия в виде щели изображение будет линейно размыто по одной из координат

В стандарте [19] применяется метод измерения размеров фокусного пятна выше 0,1 *мм* рентгеновских систем, вплоть до напряжения трубки 500 *кВ* с помощью щелевой камеры. Напряжение, подаваемое для этого измерения, ограничивается 200 *кВ*.

Камера должна состоять из блока со щелью с размерами, указанными на рис. 12 и должна быть изготовлена из вольфрама или похожего поглощающего материала.



Рис. 12. Основные размеры блока и щели (размеры указаны в миллиметрах): 1 – ось симметрии

Угол между направлением пучка и осью симметрии щели (рис. 13) должен быть меньше 3 °.



Рис. 13 Выравнивание щели камеры: 1 – фокусное пятно; 2 – направление луча; 3 – максимальное отклонение оси симметрии щели

Поверхность щели должна быть расположена на расстоянии *m* от фокального пятна таким образом, что изменение увеличения по длине фактического фокального пятна не превышало ± 5% в направлении пучка (рис. 8) в соответствии со следующими формулами:

$$\frac{n}{m} = E; \tag{1.16}$$

$$\left(\frac{n}{m+k}\right) \ge 0.95E; \tag{1.17}$$

$$\left(\frac{n}{m-p}\right) \le 1,05E. \tag{1.18}$$

где *Е* является увеличением. *n*, *m*, *k* и *p* показаны на рис. 14.

Рентгенографический детектор должен располагаться перпендикулярно в направлении пучка на расстоянии *n* от падающего на поверхность щелевой диафрагмы, определяется из соответствующего увеличения, в соответствии с таблицей 5.

Размер фокального пятна <i>d</i> , мм	Минимальное увеличение <i>n/m</i>
от 0,1 до 2,0	3:1
> 2,0	2:1

Таблица 5 – Зависимость увеличения от размера фокусного пятна



Рис. 14. 1 – плоскость анода; 2 – опорной плоскости; 3 – рентгенографическая пленка; 4 – длина фокусного пятна; 5 – направление луча; 6 – поверхность щели блока; 7 – длина фактической фокального пятна

Размер фокального пятна определяется отдельно по длине и ширине с помощью оценки видимых размеров почернении области, деленных на выбранный коэффициент увеличения.

Опыт применения метода щелевой диафрагмы для ускорителя с энергией 5,5 МэВ описывается в [22]. Ценность этого эксперимента заключается также в том, что для измерения размеров фокусного пятна использовалась цифровая матрица детекторов с учётом всех погрешностей. Расположение основных элементов измерительной установки, используемой в схеме в целом соответствует описанной ранее схеме. Важно особенностью описанного в [22] метода является широкое применение математического моделирования на основе метода Монте-Карло. Не идеальности щелевой диафрагмы учтены многократным повторением эксперимента С последующей обработкой результатов. Сама методика и используемые алгоритмы взяты из радиологии и адаптированы для высокоэнергетического источника [22].

Методика на основе щелевого коллиматора является развитием методики определения размеров фокусного пятна рентгеновского излучения на основе применения тонкой диафрагмы из высокоплотного материала с высоким атомным номером, имеющей прямоугольную апертуру малого размера. Помимо выполнения коллиматора с толщиной, соответствующей максимальной энергии квантов ТИ, методика [20] предполагает получение распределений дозы в детекторе при нескольких размерах щели с последующей экстраполяцией зависимости ширины распределений дозы на полувысоте от размера щели к нулевому размеру щели.

Значение, полученное экстраполяцией, принимается за ширину нормального распределения квантов в фокусном пятне в направлении, нормальном плоскости щели.

На рис. 15 приведены аппроксимированные распределения дозы в детекторе при моделировании переноса излучения с контрольным объектом в виде вольфрамового щелевого коллиматора толщиной 20 мм [12] при размерах щели h в диапазоне от 0,1 мм до 1,0 мм. С уменьшением h распределения приближаются к распределению ργ(x) – распределению квантов по поверхности мишени.

На рис 16 показана зависимость ширины распределений дозы в детекторе на полувысоте от размера щели h. Моделирование выполнено при беj=0.212 мм, которому соответствует byj=0,5241мм.





Рис 15. Аппроксимированные распределения дозы в детекторе и распределение квантов по поверхности мишени $\rho_{\gamma}(x)$.

Рис 16. Зависимость ширины распределений дозы в детекторе на полувысоте от размера щели.

Зависимость полуширины на полувысоте от размера щели в диапазоне 0,1-1,0 мм – экспоненциальная. Экстраполяция этой зависимости к нулевому

значению дает значение полуширины на полувысоте, практически равное byj=0,5241мм. Т.е. методика соответствует критерию достоверности.

К сожалению измеренные в работе [22] значения полуширины на полувысоте распределений дозы в детекторе были выполнены только при размерах щели, больших 0,3 мм, и с большой методической погрешностью, следствием чего явился большой разброс значений. В частности из-за возможной погрешности в ориентации щели относительно мишени, особенно при малых размерах щели. Полученные значения позволили авторам применить только грубую линейную аппроксимацию и поэтому достоверность полученных результатов определения размеров фокусного пятна ТИ конкретного ускорителя вызывает сомнения.

1.6 Методы определение размера фокусного пятна методом «Края»

К данным методом можно отнести европейские стандарты [23, 24] и американский стандарт [25]. Данные методы основаны на непрямом измерении размера фокусного пятна – оценке нерезкости изображения на границе объекта, для чего грани проецируются под большим увеличением.

Стандарт [23] устанавливает проверку размеров фокусного пятна больше 0,5 *мм* для рентгеновских систем, вплоть до напряжения трубки 500 *кВ*, с помощью рентгеновских снимков с острыми краями. Качество изображения и разрешение рентгеновских снимков в значительной степени зависят от характеристик фокусного пятна. Визуализация качества фокусного пятна основана на двухмерном распределении интенсивности в плоскости объекта.

В качестве тестового объекта выступает край цилиндрической поверхности, помещенный в направлении пучка (рис. 17). Для этой цели используется обычный стальной цилиндр или толстостенная труба диаметром 50 *мм* до 100 *мм* и длиной около 100 *мм*. Цилиндр оборачивается листом из свинца толщиной 1 *мм* или более.



Рис. 17. Параметры для измерения размера фокусного пятна: 1 – источник/ фокусное пятна; 2 – край; 3 – свинцовый лист; 4 – детектор

Коллимирующая диафрагма с отверстием, совместимая с размером пленки должна быть расположена в передней части окна трубки.

Для характеристики фокусного пятна его размер измеряется в двух перпендикулярных направлениях.

Расстояния f и s (рис. 17) представляют, соответственно, расстояния от края источника до края цилиндра и от края цилиндра до пленки, где d_c является диаметром стального цилиндра в свинцовой оболочке. Оценка соотношения между f и s, может быть получена из заданного номинального значения размер фокального пятна. Отношение s / f может быть больше или равно в десять раз диаметра входной диафрагмы плотномера d_i , деленной на размер фокусного пятна d_n , представленной изготовителем (1.19).

$$s/f \ge 10 \cdot d_i/d_n. \tag{1.19}$$

Отношение f/d_c должно быть больше 5. Если номинальный размер фокусного пятна не известен, то связь между *s* и *f* должна быть определена экспериментально после предварительного определения размер фокусного пятна с помощью данного метода края. Часть пленки полностью подверженная воздействию излучения должна иметь плотность $D = 2,5 \pm 0,3$. Время экспозиции должно превышать 30 *c*.

Чтобы показать процедуру измерения геометрической нерезкость на рис. 18 изображен профиль плотности при 5% и 95% от общего контраста проецирующийся на ось абсцисс.

Геометрическая нерезкость μ_g будет определятся по контрасту, который является разностью в плотности измеренной в самой темной и светлой области на пленке. Длина проекций μ_{gl} или μ_{gw} зависят от ориентации оси трубки. Размер фокусного пятна определяется в соответствии со следующими уравнениями:

$$l = \frac{\mu_{gl} f}{s}; \tag{1.20}$$

$$w = \frac{\mu_{gw}f}{s}, \qquad (1.21)$$

где l – длина фокусного пятна, w – ширина фокусного пятна, f – расстояние между фокусным пятном и краем образца, s – расстояние между краем образца и детектором.



Рис. 18. Профиль плотности на пленке и его оценка

В методе [24] тестовый объект также должен иметь сферическую либо цилиндрическую форму и состоять из хорошо поглощающего излучение материала (W, Pt, Au) диаметром от 0,9 до 1,1 *мм*.

Расстояние между тестовым объектом и детектором должно соответствовать увеличению от x20 до x100 (рис. 19).



Проекционное увеличение для определения размера фокусного пятна рассчитывается по формуле:

$$M = \frac{(a+b)}{a},\tag{1.22}$$

где *а* – расстояние между источником излучения и исследуемым объектом; *b* – расстояние между объектом и плоскостью детектора.

Геометрическое увеличение:

$$M_{l,w} = \frac{D_{l,w}}{D_{real}},$$
 (1.23)

где D_l и D_w диаметр тестового объекта, измеренный на 50% уровне контраста (рис. 20) в вертикальном и горизонтальном направлении соответственно; D_{real} – реальный диаметр объекта.



Рис. 20. Профиль изображения тестируемого объекта

Согласно рис. 20. Точки А и D находятся на уровне контраста в 90%. Размер фокусного пятна в вертикальном и горизонтальном направлении определяется по формуле (1.22) и (1.23):

$$l = \frac{\left(EF + GH\right)}{M_{l}},\tag{1.24}$$

$$w = \frac{\left(EF + GH\right)}{M_{w}}.$$
(1.25)

В методе [25] приведены инструкции для определения эффективного размера мини- и микро фокальных пятен промышленных рентгеновских трубок, основанном на европейском стандарте [13].

Этот стандарт описывает метод измерения эффективного размера фокусного пятна от 5 до 300 *мкм* рентгеновской системы вплоть до напряжения трубки 225 *кВ*.

Этот метод основан на косвенных измерениях размера фокусного пятна путем измерения геометрической нерезкости, затем, используя геометрический расчет, определяется размер эффективного фокусного пятна.

Объект испытания должен быть либо набором проводов или сфер, состоящий из высоко поглощающего материала (вольфрама, вольфрамового сплава или платины). Диаметр проволоки или сферы должен быть в 20 раз больше, измеряемого размера фокусного пятна, если фокусное пятно меньше 40 *мкм*, чтобы минимизировать проникновение по краям; в противном случае, диаметр должен быть от 0,8 до 1,0 *мм* для фокусных пятен больше 40 *мкм*.

Точность зависит от пространственного разрешения системы визуализации, увеличения, и отношение сигнал-шум полученных изображений. Если оценка размера фокального пятна *s*, то оптимальное увеличение может быть определено:

$$M_{optimal} = 1 + 1.1SNR \left(P / s_{optimal} \right), \tag{1.26}$$

где SNR – неослабленное отношение сигнал/шум вне объекта, P – размер пикселя.

Если действительное увеличение меньше или равно $M_{optimal}$, то точность оценивается:

$$Precision_{estimated} = 0.71 \sqrt{[1/n(u1)]^2 + [1/n(u2)]^2} \cdot 100\%, \qquad (1.27)$$

где:

n(u1) = количество пикселей по 50 до 84% по профилю с одной стороны (от Е к F на рис. 21);

n(u2) = количество пикселей по 50 до 84% профиля на другой стороне (от G к H на рис. 21).

Если действительное увеличение более Moptimal, то точность оценивается:

$$Precision_{\text{estimated}} = 2 / SNR \cdot 100\%. \tag{1.28}$$

В данном стандарте геометрическое увеличение также рассчитывается по формуле (1.23). Однако значения размеров фокусного пятна рассчитываются на уровне контраста в 50% и 84% (рис. 21). Тогда эффективное фокусное пятно s_L и s_W рассчитываются по формулам:

$$s_L = 1,47 \times (EF + GH)/(M_L - 1),$$
 (1.29)

$$s_w = 1,47 \times (EF + GH) / (M_w - 1).$$
 (1.30)



Рис. 21. Профиль изображения тестируемого объекта

1.7 Измерение фокусного пятна при помощи эталонов нерезкости QIQ Duplex

Эталон представляет собой ряд платиновых пар проволочек различной толщины. Метод основан на получении четкого изображения этих пар проволочек, по количеству которых (четко различимых) и по соответствующим таблицам и формулам определяется размер фокусного пятна. Размеры эталонных проволочек представлены в таблице 6.

Методика заключается в следующем:

1. Эталон QIQ Duplex закрепляется на выходном окне бетатрона или рентгеновского аппарата.

2. Выбирается расстояние от мишени до эталона, с учетом того, чтобы эталон был хорошо виден.

3. Подбирается экспозиция и по номеру четко различимой раздельно пары проволочек эталона на снимке определяется размер пятна. Размер фокусного пятна в вертикальном и радиальном направлении.



Рис. 22. Схема прохождения излучения через эталон IQI Duplex.

Слияние области полутени на рис. 22, когда размер фокусного пятна *F* соответствует диаметру проволоки и расстоянию *D*. Профили тени для различных случаев показаны на рис. 23.



Рис. 23. Профили тени: a) f < D; b) f = D; c) f > D; d) f = 2D.

Уравнение (1.19) из ASTM Е 2698, может быть использовано для оценки нерезкости из-за ограниченного размера фокусного пятна [16]:

$$f = \frac{M}{M - 1} \sqrt[3]{U_i^3 - \left(\frac{2.0}{M}SRb\right)^3}$$
(1.31)

Таблица 6 – Параметры эталона нерезкости QIQ Duplex

№ пары	1D	2D	3D	4 D	5D	6D	7D	8D	9D	10D	11D	12D
Нерезкость, мм	1,6	1,26	1	0,8	0,64	0,5	0,4	0,32	0,26	0,2	0,16	0,13
Базовое пространственн ое разрешение	0,8	0,63	0,5	0,4	0,32	0,25	0,2	0,16	0,13	0,1	0,08	0,063

Методика [20] определения размера фокусного пятна ТИ на основе проволочных образцов предполагает определение изменений распределений дозы в детекторе при вводе в поле ТИ проволочных образцов разного диаметра из металла большой плотности и высокого атомного номера.

Модельная структура метода определения размера фокусного пятна ТИ на основе исследования возмущающего действия проволочных образцов, приведена на рис. 24.



Рис. 24. Модельная структура методики на основе проволочных образцов.

Геометрический размер М области возмущающего действия образца на регистрируемую детектором дозу тормозного излучения, с учетом того, что 52 ширина на полувысоте распределения квантов $\rho\gamma(x)$ принята за эффективный размер фокусного пятна и что B << L1, B << L2 и B < 1 мм, равен M = M1 + 2 * M2, где M1 = B * (L1+L2)/L1, a M2 = b * L2 / (2*L1).

Тестирование метода определения размера фокусного пятна заключалось в определении соответствия между параметрами нормального распределения ТИ ργ(x) по поверхности мишени при облучении пучками электронов при разных параметрах нормальных распределений ρe(x), полученными при исследовании распределений квантов ТИ по поверхности мишени, и параметрами распределений квантов ТИ, полученными из изменений распределений дозы в детекторе при введении проволочных образцов в поле ТИ при моделировании переноса излучения через модельную структуру метода.

Типичное изменение распределения дозы в детекторе при введении проволочного образца диаметром Ві в поле ТИ показано на рис. 25 .

Ширина изменения распределения дозы в детекторе d(Bi,Gej) на уровне N% при введении образца с диаметром Bi при распределении электронов в пучке со среднеквадратичным отклонением Gej – искомый параметр тестирования метода.



Рис. 25. Изменение распределения дозы в детекторе при введении проволочного образца в поле ТИ.



Рис. 26. Иллюстрация реализации методики на основе проволочных образцов для различных распределений квантов в фокусном пятне ТИ.

На рис. 26 показана зависимость геометрического размера М* области возмущающего действия образца на регистрируемую детектором дозу тормозного излучения от диаметра проволочного образца Ві в предположении, что b=Bi, M* = K*(K-1)* Bi, K = (L1+L2) /L1.

Здесь же показаны зависимости ширины изменения распределения дозы в детекторе d(Bi,Gej) на уровне N=17% от диаметров образцов Bi при толщине мишени t=0.6 мм при распределениях электронов в пучке со среднеквадратичными отклонениями Gej из таблицы 1.

В таблице 7 приведены абсциссы bj (b1, b2, b3, b4) общих точек зависимостей M*(Bi) и d(Bi,Gej), а также значения ширины на полувысоте распределения квантов bγj на поверхности мишени из таблицы 1.

Таблица 7 – Параметры нормальных распределений облучающих электронов (беј,) и ТИ (bүj) на поверхности мишени толщиной 0.6 мм и определенные моделированием метода bj.

	1	2	3	4
б _{еј} , mm	0.159	0.186	0.212	0.265
b _{yj} , mm	0,394	0,459	0,524	0,643
b _j ,mm	0.418	0.479	0.526	0.618
$(\mathbf{b}_j - \mathbf{b}_{\gamma j}) / \mathbf{b}_{\gamma j},$	+2.3	+4.2	+0.36	-0.3
%				

Относительное различие между значениями ширины распределений ТИ на поверхности мишени byj и значениями ширины распределений bj, определенных моделированием метода, (bj - byj) / byj (таблица 7), в исследованном диапазоне byj не превышает нескольких процентов. Т. е. смоделированная методика определения размера фокусного пятна ТИ на основе проволочных образцов соответствует критерию достоверности. Естественное положение о нормальном распределении электронов в процессе ускорения и формирования пучка электронов на мишень и соответствующий этому положению нормальный вид распределений квантов в фокусном пятне на поверхности мишени, подтвержденный статистическим моделированием переноса излучения в веществе мишени, позволяет смоделировать методики определения эффективного размера фокусного пятна ТИ в виде ширины распределения квантов по поверхности мишени на полувысоте распределения.

Из-за невозможности прямой экспериментальной проверки статистическое моделирование переноса излучения является единственным средством тестирования методик определения размеров фокусных пятен и оценки их соответствия критерию достоверности.

Модельное тестирование методик определения размеров фокусных пятен ТИ показало, что критерию достоверности соответствуют методика на основе щелевого коллиматора с изменяемым размером щели и методика на основе введения в поле ТИ проволочных образцов разного диаметра. Достоверность методики на основе специального объектива ограничена отсутствием сведений по обработке распределений дозы в детекторе.

Соотнесение результатов моделирования методики на основе щелевого коллиматора и экспериментальных результатов применения этой методики [20] показывает необходимость выполнения этой методики с большей точностью, чем она была выполнена. Точность этой методики ограничена очевидной критичностью по ориентации щели коллиматора относительно мишени ускорителя, особенно при малых размерах щели.

Методика на основе проволочных образцов не имеет этого недостатка.

Экспериментальное сравнение методик на одном и том же источнике ТИ при тщательном их исполнении позволит выявить достоинства методик.

2 Детекторы рентгеновского излучения

эффективно Принцип детектирования состоит В TOM, чтобы преобразовать рабочем теле детектора выделенную в энергию В электрические сигналы, которые могут быть измерены с помощью для дальнейшей обработки. Методы электроники записаны И детектирования частиц ΜΟΓΥΤ использовать в качестве рабочей среды детектора различные вещества во всех возможных агрегатных состояниях.

Заряженная первичная частица в основном тратит свою энергию на ионизацию и возбуждение атомов и молекул вещества. Образованные при двигаться во внешнем электрическом поле, ионизации заряды могут электрической цепи. Метод регистрации, создавая ток во внешней основанный на измерении электрического тока от движения зарядов, образованных ионизирующим излучением называют ионизационным методом. Приведенные в возбужденное состояние атомы, возвращаются в основное состояние с излучением квантов света. Рекомбинация свободных электронов и ионов также может приводить к выделению энергии связи атома в форме квантов света, а в твердом теле – фононов. Фотонное излучение. возникшее в веществе в результате высвобождения атомов среды, называется сцинтилляцией. Метод регистрации частиц и излучений, на фиксации и измерении сцинтилляций, основанный называется сцинтилляционным.

В сцинтилляционном методе регистрации излучений величина сигнала пропорциональна числу фотонов, испущенных при возбуждении частицей. Для характеристики преобразования сцинтиллятором энергии частицы в свет в большинстве случаев используется понятие конверсионная эффективность ξ , равная отношению световой энергии, испущенной сцинтиллятором, к энергии частицы потерянной в веществе:

$$\xi = N_{\phi} h \nu E_{\rho}, \qquad (2.1)$$

где hv – средняя энергия и N_{ϕ} – число испущенных фотонов. Между средней энергией, идущей на образование фотона, и конверсионной эффективностью имеется связь:

$$\xi = h \nu / w_{\phi} \quad , \tag{2.2}$$

где w_{ϕ} – средняя энергия, затраченная на образования одного фотона [26].

Схема применяемых детекторов рентгеновского излучения служащих изображения получения представлена на рис. 27. В связи ДЛЯ С КΤ запись изображения происходила возникновением при помощи рентгеновских плёнок. В предыдущие годы применялись запоминающие пластины многоразового использования.



Рис. 27. Типы детекторов рентгеновского излучения

В работе [27] указывается, что в последние 20 лет широко распространение получили цифровые детекторные системы ЦДС. Данный тип детекторов дал толчок в разработке новых приложений, основанных на компьютерных технологиях. Эти разработки стали также применяться и в неразрушающем контроле (Non Destructive Testing, NDT). Под этими технологиями подразумеваются технологии калибровки ЦДС, что дает возможность почти целиком избежать их собственных шумов. Так же в данной работе указывается, отсутствие такой возможности у пленочных систем и систем с запоминающими пластинами. В связи с этим ЦДС имеют наиболее низкий уровень шума, высокую чувствительность и контраст изображения.

До сих пор наиболее массово в промышленности применяемым детектором рентгеновского излучения является рентгеновская плёнка. Но вследствие развития новейших методов регистрации рентгеновских изображений уменьшаются и объемы промышленного применения пленки.

Следует отметить применение данных запоминающих пластин с целью получения изображений в компьютерной радиографии. Запоминание изображения в данных пластинах осуществляется за счет слоя с фотостимулируемой памятью (сложное химическое соединение типа BaFBrxl1-x:Eu²⁺).

Что же касается современных типов детекторов, то их следует рассмотреть подробнее в силу их наибольшего использования и лучших характеристик.

В ЦДС прямого преобразования, влияние рентгеновского кванта в толщине полупроводника сразу генерируют электронно-дырочные пары. Возникающий электронный ток вследствие приложения напряжения усиливается и при помощи считывающей электроники преобразуется в изображение. Наиболее широкое применение получили ЦДС прямого преобразования на основе аморфного селена (aSe) и монокристаллического теллурида кадмия (CdTe). Тонкопленочные транзисторы на основе aSe покрываются слоем аморфного селена, позволяющего без применения сцинтилляторов или фосфора напрямую конвертировать рентгеновское излучение в цифровой сигнал. Вследствие отсутствия воздействия рассеяния и наилучшего отношения сигнал/шум, что позволяет достичь качества изображения сравнимого с качеством среднезернистой плёнки. Однако

ограничением детекторов на основе селенового слоя является ограниченный диапазон рабочих температур. Нарушение этого диапазона приводит к разрушению селенового слоя. И при энергиях, больше 180 κ эB, возможно образование фантомных изображений. ЦДС на основе CdTe не имеет ряда недостатков предыдущей. Система имеет возможность работать в более широком температурном диапазоне при энергиях рентгеновских квантов до 300 κ эB, обладая при этом в несколько раз большей чувствительностью.

Принцип ЦДС непрямого преобразования заключается в том, что рентгеновские кванты вначале взаимодействуют со сцинтилляторами и далее свет преобразуется образуют фотоны света, и или сразу в электрический сигнал, ИЛИ В поток электронов В рентгеновском электроннооптическом преобразователе (РЭОПе), который создает видимое изображение на выходном люминофорном экране. Чаще всего в качестве ЦДС непрямого преобразования используются панели на основе аморфного кремния aSi. В детекторах данного типа применяются сцинтилляторы на основе CsI или оксисульфида гадолиния, преобразующие рентгеновское излучение в видимый свет. Полученный видимый свет впоследствии конвертируется сенсорами aSi в заряд. Чувствительность детектора со сцинтиллятором из оксисульфида гадолиния будет напрямую зависеть от толщины покрытия. При увеличение толщины покрытия, вследствие рассеяния света ухудшается пространственное разрешение детектора.

Рентгеновское излучение хорошо поглощается панелями с покрытием из CsI в инервале энергий рентгеновских фотонов 40-300 кэВ. Поглощение происходит за счет фотоэффекта. При энергиях выше 300 кэВ вклад в поглощение рентгеновских квантов становится существенным вследствие эффекта Комптона. Слой CsI:Na генерирует при поглощении рентгеновских лучей голубой свет, который распространяется вдоль монокристаллических острий как по оптоволокну (т.е. без рассеяния) по направлению к фотодиодной матрице.

Производимые ранние эксперименты с панелями на основе aSi показывали высокий уровень шума. Усреднение по многим кадрам за счёт развитие технологий и программных возможностей дало возможность улучшить отношение сигнал-шум. На данный момент качество получаемых изображений на этих панелях, превышает качество, даваемое запоминающими пластинами и приближается к качеству изображения панелей из aSe. Так же следует отметить, малую чувствительность панелей из aSe к условиям окружающей среды.

Механической основой любого плоскопанельного детектора является стеклянная подложка, на которую устанавливается считывающая электроника.

TFT (thin film transistors) – технология, использующаяся в основном в панелях из aSi или aSe. Активная TFT-матрица с ЦДС непрямого преобразования представляет собой сборку фотодиодов. Детекторный слой в ЦДС с прямым преобразованием, располагается прямо на матрицу. Матрица TFT-транзисторов является довольно простой структурой электронных переключателей.

Очень высокая радиационная устойчивость, является отличительной особенностью панелей на основе aSi, позволяющей применять данный тип панелей при высоких энергиях рентгеновских квантов. Поскольку процесс производства панелей на базе аморфного материала и TFT-технологии требует специфического оборудования и условий производства, такие панели достаточно дороги.

Существуют две технологии, наиболее используемые для получения высококачественных рентгеновских изображений – прибор с зарядовой связью (ПЗС) и комплементарная структура металл-оксид-полупроводник (КМОП).

ПЗС (coupled charge device, CCD) был изобретён У. Бойлом (W. Boyle) и Дж. Смитом (G. Smith) в 1969 [28]. ПЗС-элемент представляет собой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) конденсатор. Различие ПЗС-

панелей в отличие от других твердотельных приборов заключается в том, что электрический сигнал представлен зарядом, а не током или напряжением. Считывание сигнала происходит путем транспортировки зарядовых пакетов вдоль кремниевой подложки. Преимуществом таких панелей является низкий шум, высокая чувствительность. В ПЗС-панелях как правило используют буферные вставки из оптоволокна, что позволяет увеличить площады приемного окна панели и при этом одновременно служат защитой от радиационного излучения. Однако даже с таким добавочным ПЗС панели могут работать только при экранированием энергиях рентгеновских квантов <50 кэВ.

В основе работы ПЗС лежит явление внутреннего фотоэффекта. Фотоны падающего на матрицу света попадают в кремниевую подложку, образуя в ней пару дырка-электрон. Дырки, как сказано выше смещаются вглубь подложки, а электроны накапливаются в потенциальной яме. Накопившийся заряд пропорционален количеству фотонов падающих на элемент, т. е. интенсивности светового потока. Таким образом, на матрице создается зарядовый рельеф, соответствующий оптическому изображению. Далее используется свойство ПЗС-элементов перемещать заряды под действием подаваемых тактовыми импульсами потенциалов на электроды смещения.

КМОП (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) – технология, представляет собой матричную сборку на основе тонкопленочного транзистора с aSi. Важным преимуществом данной технологии перед прочими является применение хорошо наработанной промышленной базы в производстве интегральных схем. Уровень шумов данных панелей подошел к уровню ПЗС-панелей, а динамический диапазон в несколько раз выше. Самое высокое пространственное разрешение с размером пикселя в несколько *мкм*, получен на КМОП-панелях.

Основой, на которой работает данный тип датчиков, является кристалл кремния, на котором размещается датчик и электроника для преобразования

⁶¹

сигналов. Для снижения потребление энергии камеры в некоторые датчики возможно добавление аналогово-цифрового преобразователя. Процесс получения изображения в КМОП-панелях упрощается за счет работы на любой частоте кадров с функцией прогрессивного сканирования. Заряд, содержащийся в каждой точке датчика при попадании на него света, сразу преобразуется в напряжение. При помощи усилителей и транзисторов напряжение преобразуется в изображение. То есть, считывание изображения происходит уже с конкретного участка чипа.

Таким образом, чувствительность И нерезкость получаемых рентгенографической изображений пленки зависит OT размеров И концентрации зерен, толщины ЭМУЛЬСИОННОГО слоя, эффективности поглощения рентгеновского излучения и способа проявления плёнки. Процесс КТ заключает в себе получение большого количества снимков (срезов), что делает применения рентгенографической пленки трудоёмким, ресурсозатратным и продолжительным по времени.

ЦДС же позволяют получать изображения в режиме реального времени с последующей обработкой с помощью специальных программ, что уменьшает время сканирования исследуемого образца. Однако не все ЦДС обладают высокой радиационной стойкостью. Вследствие чего в зависимости от характеристик источника излучения следует подбирать материал сцинтиллятора, из которого изготавливается матрица. Высокой радиационной стойкостью обладает матрица изготовленная на основе TFTтехнологии. К отрицательной стороне ЦДС можно отнести появления «плохих» или «мёртвых» пикселей.

2.1 Калибровка цифровых детекторных систем

Калибровка плоскопанельного детектора является одной из важнейших операций, обеспечивающих, получение отношения сигнал/шум и контрастной чувствительности. С помощью калибровки можно полностью

скорректировать изображения. Калибровка включает захват изображений изображение) при полной (светлопольное И нулевой (темнопольное изображение) дозовых нагрузках (рис. 28). Темнопольное изображение используется для получения, базового, «темнового» сигнала от детектора, который определяется токами фотодиодов, токами утечки тонкопленочных транзисторов и разницей между различными зарядовыми усилителями, используемыми в считывающей электронике. Светлопольное изображения используются для расчета усиления, или отклика, каждого пикселя, и соответствующего считывающего усилителя. Одним из источников шума в детекторе является коррелированный линейный шум, который является шумом, присущим одновременно всем пикселям данной строки. Современные программные средства позволяют провести процедуру коррекции этого шума, которая должна приводить к минимизации вариаций вследствие этого шума. Для этого доля сенсоров панели маскируется от сцинтилляционного экрана, и, таким образом, не получает светового сигнала время рентгеновской экспозиции. Сигнал от этой части панели BO соотносится с темнопольным изображением, для определения коррекции, быть Результирующие которая должна внесена В каждую строку. калибровочные изображения используются для нормализации отклика пикселей.



Рис. 28. Калибровочные изображения полученные ЦДС: *а*) Темнопольное изображения; *б*) Откалиброванное изображение

2.2 Коррекция «плохих» пикселей

Наряду с калибровкой цифровых систем следует также выделить коррекцию «плохих» пикселей [29]. Основными типами «плохих» пикселей можно назвать следующие три:

Не усиливающий пиксель, или «мертвый» пиксель. Сигнал от него не зависит от дозы облучения.

Сверхчувствительный пиксель. Значение уровня серого для него более чем в 1,3 раза превышает среднее по площадке из 21х21 пикселей.

Малочувствительный пиксель. Значение уровня серого для него менее чем в 0,6 раза меньше среднего по площадке из 21х21 пикселей.

Для коррекции «плохих», выявляющихся в виде плохих строк, используют алгоритм коррекции плохих пикселей. Данный алгоритм усредняет сигналы от соседних пикселей, используя полученное среднее значение для плохих пикселей. Таким образом, каждый пиксель имеет 8 ближайших соседних пикселей (за исключением тех, которые находятся на краю сенсорной панели). Если, по крайней мере, 3 из них считаются хорошими, только при этом возможна операция усреднения их для получения значения плохого пикселя. В противном случае плохой пиксель не может быть скорректирован правильно.

2.3 Основные параметры качества изображения

Радиографическое изображение, получаемое с помощью ЦДС, описывается в работе [27] следующими главными параметрами качества изображения:

1. Базовое пространственное разрешение SRb (basic spatial resolution), измеренное с помощью эталона с двойной проволокой согласно стандарту EN 462-5 [28] и равное половине зарегистрированной нерезкости изображения или эффективному размеру пикселя. Иногда пользуются понятием «разрешающая способность», которая определяется из зависимости контраста соседних объектов от расстояния их разделяющего. Эта зависимость называется модуляционной передаточной функцией (MTF) или контрастной передаточной функцией. Величина, обратная расстоянию, разделяющему соседние объекты, называется пространственной частотой и измеряется, по аналогии с пленкой, в парах линий/мм.

2. Нерезкость изображения определяется геометрической нерезкостью, деленной на увеличение (проекционная нерезкость) и нерезкостью детектора, описываемой базовым пространственным разрешением SRb (равным половине нерезкости детектора).

3. Отношение сигнал/шум SNR (signal-to-noise ratio). Детектор характеризуется нормированным отношением сигнал/шум SNR_{norm} как функции условий экспозиции (экспозиционной дозы и радиационного качества). Нормировка измеренного отношения сигнал/шум на базовое пространственное разрешение необходима, поскольку измеренное значение отношения сигнал/шум увеличивается как квадратный корень от площади детектирующих пикселей.

4. Отношение контраст/шум CNR (contrast-to-noise ratio). В общем случае CNR зависит от отношения сигнал/шум детектора и эффективного коэффициента поглощения материала.

5. Чувствительность детектирования (контрастная чувствительность C_s = 1/ CNR, где CNR есть отношение контраст/шум) небольшого изменения радиационной толщины объекта Δw (происшедшей из-за наличия дефекта внутри объекта) определяется отношением контраста (изменения интенсивности сигнала Δl) к уровню шума изображения (стандартное отклонение от *l*). CNR для данного Δw может быть рассчитано из SNR

(отношения сигнал/шум) изображения с учетом коэффициента поглощения µ и коэффициента рассеяния k (равного отношению интенсивностей рассеянного и первичного излучения).

6. Динамический диапазон (диапазон радиационных толщин объекта, доступных анализу на одном и том же изображении). Поскольку для пленок эта величина фиксирована (ограничена диапазоном оптических плотностей 2 - 4.5 и µ_{эфф}), то она не считается параметром для пленочной радиографии, учитываемым в стандартах. В то же время большой динамический диапазон ЦДС в ряде практических приложений может иметь решающее значение при выборе детектора.

3 Практическая часть

Схема томографической системы приведена на рис. 29. Источником излучения включает в себя бетатрон МИБ-4. В качестве детектора использовался цифровой рентгеновский плоскопанельный детектор серии XRD 1622 производства компании Perkin-Elmer [30].



Рис. 29. Общий вид экспериментальной установки: 1 – блок источников излучения; 2 – блок ВИП источников излучения; 3 – пульт управления ротационным столом; 4 – детектор; 6 – ротационный стол.

Малогабаритные импульсные бетатроны типа МИБ – используются для радиографического контроля качества материалов и изделий в нестационарных условиях: на монтажных и строительных площадках, на стапелях, при контроле сварных соединений и запорной арматуры нефте и газопроводов, ремонте энергетических и кательных установок, контроле опор мостов и других ответственных строительных конструкций, а также контроле литья и сварных соединений больших толщин. Бетатрон может применяться в качестве источников тормозного излучения для интроскопов.

Бетатрон состоит из блока излучателя, блока питания и пульта управления. Основные характеристики бетатрона МИБ-4 приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристики бетатрона МИБ-4

Энергия ускоряемых электронов, МэВ	3,5
Высота фокусного пятна, мм	0,3

Ширина фокусного пятна, мм	3
Ускоряемый ток, А	$5 \cdot 10^{-9}$
Максимальная толщина просвечивания, мм	150
Частота импульсов излучения, Ги	200
Масса общая / излучателя, кг	100/60
Мощность дозы на расстоянии 1 <i>м</i> от мишени,	2
Р/мин	

Детектор серии XRD 1622 используется для получения изображений в рентгеновской компьютерной томографии промышленного неразрушающего контроля и обеспечение безопасности.

Плоскопанельный детектор XRD 1622 изготавливается с помощью TFT-технологии на основе aSi (аморфного кремния). Каждый пиксель в массиве состоит из светочувствительных фотодиодов и переключаемого тонкопленочного транзистора одной электронной схемы. Аморфный кремниевый фотодиод чувствителен к видимому свету, с кривой отклика примерно сопоставимой с человеческим зрением. Пики чувствительности аморфного кремниевого фотодиода находятся в диапазоне длин волн 500-565 *нм*, которые хорошо совпадают с сцинтилляционными свойствами йодистого цезия CsI и оксисульфида гадолиния Gd₂O₂S:Tb. Падающие рентгеновские лучи преобразуются материалом сцинтиллятора в видимый свет, который генерируется в электронно-дырочные пары в отдельном фотодиоде. Механические характеристики плоскопанельного матричного детектораXRD 1622 представлены в таблице 9.

матричного детектора ЛКD 1022				
Размер	500 мм х 560 мм х 22 мм			
Macca	8,7 кг			
Датчик:	одиночная стеклянная подложка			
Общее количество пикселей	2048 x 2048			
Активное число пикселей	2024 x 2024			
Размер пикселя	200 мкм			
Общая площадь детектора	409,6 х 409,6 <i>мм</i> ²			
Сцинтиллятор	CsI:Tl (прямое осаждение на aSi			
_	фотодиоды)			

Таблица 9 – Механические характеристики плоскопанельного матричного детектора XRD 1622

Рабочий диапазон 20 кэВ - 1	15 МэВ
-----------------------------	--------

Для определения фокусного пятна в качестве тестового объекта использовались: щелевая диафрагма и эталон Duplex IQI EN462-5. Схема эксперимента указана на рис. 30.



Рис. 30. Схема эксперимента: 1 – бетатрон; 2 – вольфрамовая мишень закрепленная внутри ускорительной камеры; 3 – коллиматор; 4 – система позиционирования; 5 – тестовый объект; 6 – детектор изображения

3.1 Определение фокусного пятна при помощи щелевой диафрагмы

Измерение размера фокусного пятна при помощи щелевой диафрагмы и «Pinhole»-камеры основаны на принципе камеры-обскура рис. 31.



Рис. 31 Схема эксперимента щелевой камеры.

В идеальном случае толщина ребер пренебрежимо мала, что практически недостижимо. Принимая во внимание конечную толщину щели камеры, распределение интенсивности показано на рис. 32.



Рис. 32. Гауссово приближение FWHM



$$FI = (f - d) \frac{(2L + h)}{(2l - h)} - d, \qquad (3.1)$$

$$Fl = (f+d) \frac{(2L-h)}{(2l+h)} + d,$$
(3.2)

где f – размер фокусного пятна, d – размер щели, h – толщина камеры щели. *F1* - *F2* определяет размер полутени. Влияние конечной толщины щели камеры можно скорректировать с помощью *FWHM* профиля рентгеновского пучка [22].

$$f = \frac{FWHM}{M-l} - d(l - \frac{l}{M}); M = \frac{L+l}{l}.$$
 (3.3)

Значения *h* и *d* равны 0 (толщина пренебрежимо мала) и выражения в идеальном случае могут быть преобразованы (полутень не наблюдается):

$$F1 = F2 = f(M - 1).$$
 (3.4)

Принимая во внимание (3.1) и (3.2) можно вычислить выражение для толщины края и щели, ограничивая размер, решая уравнение F1 - F2 = 0. Решение заключается в следующем:

$$h_{max} = \frac{2dl}{f}; d_{min} = \frac{fh}{2l}.$$
 (3.5)

Используя выражения (3.5), а также выражение линейного коэффициента ослабления для требуемого материала щелевой камеры можно оценить значение границы геометрических размеров камеры. Рис. 33 показывает геометрию щелевой камеры выполненной из стали, используемой в эксперименте.



Рис. 33. Камера с переменным размером щели, используемая в эксперименте (размеры указаны в *мм*)

Заявленное значения фокусного пятна (в горизонтальном направлении) бетатрона МИБ-4 F=0,3 мм. Расстояние l=250 мм (рис. 31) и размер щели d=0,1 мм можно убедиться, что максимальная толщина щели камеры не превышает максимальную допустимую. Щелевая камера была изготовлена из стали.

В статье [22] была использована щелевая камера изготовленная из вольфрама для измерения размер фокусного пятна 5 *МэВ*-го ускорителя. По сравнению с линейным ускорителем, бетатрона имеет более низкую интенсивность излучения, а также меньший размер пятна. Это уменьшает требования к материалу щелевой камеры, используемой в нашей экспериментальной установке. Использование цифрового рентгеновского детектора позволяет повысить контрастность изображения, полученные при сравнении с рентгеновской пленкой.

Ниже приведены профили изображения щелевой камеры полученных при энергии ускоренных электронов *E*=3,5 *МэВ*, 3,0 *МэВ*, 2,5 *МэВ* и шириной

щели *d*=0,1 *мм* и 0,2 *мм*. Рассчитанные значения фокусного пятна сведены в таблицу 10.



Рис. 34. Профиль изображения щелевой камеры при d=0,1 мм, E=3,5 МэВ



Рис. 35. Профиль изображения щелевой камеры при *d*=0,1 мм, *E*=3,0 МэВ



Рис. 36. Профиль изображения щелевой камеры при *d*=0,1 *мм*, *E*=2,5 *М*эВ


Рис. 37. Профиль изображения щелевой камеры при *d*=0,2 мм, *E*=3,5 МэВ



Рис. 38. Профиль изображения щелевой камеры при *d*=0,2 мм, *E*=3,0 МэВ



Рис. 39. Профиль изображения щелевой камеры при *d*=0,2 мм, *E*=2,5 МэВ

Таблица 10 – Рассчитанные знания фокусного пятна по формуле (3.3) при *M*=5

d, мм	3,5 МэВ	3,0 МэВ	2,5 МэВ

	<i>f, мм</i>					
0,1	0,25	0,14	0,17			
0,2	0,20	0,37	0,34			

3.2 Определение фокусного пятна при помощи эталона IQI Duplex

Косвенный метод основан на связи между базовым пространственным разрешением и размером фокусного пятна. Размер фокусного пятна рассчитывался по формуле (1.31) путем измерения Базового пространственного разрешения *SRb* и нерезкости изображения *U_i*. Полученные рентгенограммы можно использовать для *SRb* и *U_i* путем измерения глубины модуляции (dip) соседних пар проводов.

Профиль изображения используется для распознавания первой пары проводов с глубиной модуляции (dip) не менее 20%. Глубина модуляции (dip, puc. 40) согласно стандарту [29] рассчитывается в % по формуле:

$$dip = 100 \cdot (A + B - 2C)/(A + B). \tag{3.6}$$



Рис. 40. Схема для расчета значения dip

Ниже приведены профили изображения двойного проволочного эталона. полученных при энергии ускоренных электронов 3,5 *МэВ*, 3,0 *МэВ*, 2,5 *МэВ*. Рассчитанные значения фокусного пятна сведены в таблицу 15.



Рис. 41. Профиль изображения двойного проволочного эталона при 3,5 МэВ

raosinga 11 Tace infamas dip lipit 5,5 105b							
№ пары	D8	D9	D10	D11	D12		
Измеренная глубина модуляции dip, %	65,90	63,39	53,64	50,92	0		
Максимальная нерезкость U _i , мм	0,32	0,26	0,20	0,16	0,125		
Максимальное Базовое	0,16	0,13	0,10	0,08	0,063		
пространственное разрешение (SRb), мм							

Габлица 11 – Рассчитанная dip при 3	5.5	МэВ	
-------------------------------------	-----	-----	--



Рис. 42. Профиль изображения двойного проволочного эталона при 3,0 МэВ

raomiga 12 raov infamilar alp inpir 2,0 mod							
№ пары	D8	D9	D10	D11	D12		
Измеренная глубина модуляции dip, %	71,06	65,36	52,56	29,91	0		
Максимальная нерезкость, мм	0,32	0,26	0,20	0,16	0,125		
Максимальное Базовое	0,16	0,13	0,10	0,08	0,063		
пространственное разрешение (SRb), мм							

Таблица 12 – Рассчитанная dip при 3.0 МэВ



Рис. 43. Профиль изображения двойного проволочного эталона при 2,5 МэВ

ruomidu 15 Tude infumitus dip lipit 2,5 mob							
№ пары	D7	D8	D9	D10	D11		
Измеренная глубина модуляции dip, %	60,00	58,85	44,39	31,89	0		
Максимальная нерезкость, мм	0,40	0,32	0,26	0,20	0,16		
Максимальное Базовое	0,20	0,0.16	0,13	0,10	0,08		
пространственное разрешение (SRb), мм							

Таблица 13 – Рассчитанная dip при 2,5 МэВ

T	аблица	14		Размер	ЭЫ	фоку	усного	пятна
---	--------	----	--	--------	----	------	--------	-------

Е, МэВ	3,5	3,0	2,5
<i>f</i> , <i>м</i> м	0,199	0,199	0,245



Рис. 44. Профиль изображения двойного проволочного эталона при 3,5 *МэВ* полученный на рентгенографическую плёнку. Рассчитанное значение *f*=0,245 *мм*

№ пары	D7	D8	D9	D10	D11
Измеренная глубина модуляции dip, %	60,92	56,37	48,22	43,84	0
Максимальная нерезкость, мм	0,40	0,32	0,26	0,20	0,16
Максимальное Базовое	0,20	0,0.16	0,13	0,10	0,08
пространственное разрешение (SRb), мм					

Таблица 15 – Рассчитанная dip при 3,5 МэВ

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований[31].

Помимо превышения технических параметров над предыдущими разработками необходимо понимать коммерческую привлекательность научного исследования.

«Финансовый Таким образом, раздела целью менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и конкурентоспособных разработок, технологий, создание отвечающих современным требованиям области ресурсоэффективности В И ресурсосбережения[32].

Достижение цели обеспечивается решением задач:

1. планированием исследовательских и научных работ;

2. определением ресурсосберегающей, экономической, финансовой и социальной эффективности исследований[33].

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений представлена в таблице 16.

В соответствии с технологией каждый показатель оценивается экспертным путем по сто балльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а

5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Оценка качества и перспективности по технологии определяется по формуле[31]:

$$K = \sum B_i \cdot \overline{B}_i, \qquad (4.1)$$

где K – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки; B_i – вес показателя (в долях единицы); E_i – средневзвешенное значение *i*-го показателя.

Таблица 16 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес	Ба	ЛЛЫ	Конкуренто- способность		
	npiii c piin	$\mathrm{F}_{\mathrm{\Phi}}$	$\mathbf{b}_{\kappa 1}$	К _ф	$K_{\kappa 1}$	
1	2	3	4	5	6	
Технические крите	рии оценки	ресурсоэ	ффективн	ости		
1.Повышение						
производительности труда	0,12	3,5	3	0,42	0,36	
пользователя						
2. Удобство в эксплуатации						
(соответствует требованиям	0,07	3,8	3,3	0,19	0,17	
потребителей)						
3. Простота эксплуатации	0,07	2,5	2,3	0,18	0,16	
4. Надежность	0,09	3	2,5	0,27	0,23	
5. Уровень материалоемкости	0.15	Λ	3.7	0.60	0.48	
разработки	0,15	4	5,2	0,00	0,40	
6.Унифицированность	0,09	3,7	3,5	0,33	0,32	
7. Безопасность	0,05	3,5	3,5	0,18	0,18	

8. Ремонтопригодность	0,11	3,2	3	0,35	0,33			
Экономические критерии оценки эффективности								
1. Цена	0,11	1,5	1,5	0,18	0,18			
2.Предполагаемый срок эксплуата-	0,12	3,6	3,2	0,47	0,42			
3.Наличие сертификации разработки	0,5	4	3	0,56	0,42			
ИТОГО	1			3,30	2,87			

Рассчитанное значение K_{ϕ} позволяет говорить, что перспективность разработки выше среднего. Сравнивая два аналогичных способа, можно сказать, что используемый метод более прост в использовании и обладает лучшей конкурентно-способностью.

4.1 Планирование научно-исследовательских работ

Для выполнения научных исследований была сформирована рабочая группа, в состав которой входили: научный руководитель и студент. Численность группы составляла 2 человека. По каждому виду работ устанавливалась соответствующая должность исполнителя. Порядок этапов, работ и распределение исполнителей по данным видам работ приведены в таблице 17 [34].

Для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательных действий необходимо составить календарный график выполнения НИОКР [35].

Таблица 17 – Календарный план ВКР

N⁰	Название	Длитель	Дата	Дата	Состав
работ		ность,	начала	окончания	участников

Ы		дни	работ	работ	
	Разработка				Научный
1	технического				руководитель
	задания на ВКР				
	Выбор				Студент,
2	направления		-		научный
	исследований				руководитель
	Эксперименталь				Студент,
3	ные		-		научный
	исследования				руководитель
	Теоретические				Студент,
4	расчеты				научный
					руководитель
	Подбор и				Студент
5	изучение				
	литературы				
	Обобщение и				Студент,
6	обработка		-		научный
	результатов				руководитель
7	Оформление				Студент
	ВКР				

Построим диаграмму Ганта [36], так как она является наиболее наглядным и удобным графиком для проведения научных работ. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график с отрезками, которые характеризуют сроки начала выполнения работ и их окончания. Представлены протяженными во времени отрезками с различной штриховкой (отвечающей за исполнителя работы) [37]. Таблица 18 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме «Определение размера фокусного пятна высокоэнергетической томографической системы на основе бетатрона»

N⁰	Вид работ Исполнит. Т _{кі}			Продолжительность выполнения работ						
раб					, кап пн	январь	февраль	март	апрель	май
от					лωн. дн.	1	1	1	1	-
						2	2	2	2	4
		0	•			8				
	TKa	KOFG	BKF	yк.		8				
	oaбo	чес	ВИН	(d.ዞ/		8				
	Paag	инха	адан	Hay		8				
	, ,	T	3	r .						
	ения	й		цент						
	aBJ	зани		Сту,						
	напр	едон		/К.		8				
	i do	ССЛ		н. ру		8				
	Bыĉ	И		Hay		8				
	ble									
	альн	вин		/ден						
	ента	OBal		CTJ.						
	мид	след		рук.			888			
	icne]	ИСС		Уч.			88			
	Эĸ			Ha		~~~~~				1
	Ð			(ент						
	СКИ	1		CTy						
	энис	четі				-	00000		-	
	орел	pac		рук				8		
	Te			ауч.				8		
		<u> </u>	C	Н						
	op E	эние	aTyl	lент						
	0дб	зуч(итер	CTYL						
	П	И	Щ)						

сение и нка 6татов	Студент			
Обобш оце резул	Науч. рук.		Ĵ	
Оформление ВКР	Студент			

Таблица 19 – Исполнители календарного план-графика

Научный руководитель	
Студент	

4.2 Бюджет научно-технического исследования

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;

- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.

Стоимость всех материальных затрат, используемых при разработке проекта приведена в таблице 20.

Расчет материальных затрат осуществляется по формуле:

$$3_{M} = (1 + k_{T}) \sum_{i=1}^{m} \mathcal{U}_{i} \cdot N_{pacxi}, \qquad (4.2)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования: N_{pacxi} – количество материальных ресурсов *i*-го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); \mathcal{U}_i – цена приобретения единицы i-го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.); k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (15 % от стоимости материалов).

Наименование	Единица	Количество	Цена за ед	Затраты на	
материала	измерения		Ц _{<i>i</i>} , руб	материалы	
				З _м , руб	
Основные мате	риалы				
Проявитель Agfa		200	0.188	37.6	
Structurix G128	1111	200	0,100	57,0	
Фиксаж Agfa		200	0.153	30.6	
Structurix G328	1111	200	0,155	50,0	
Рентгенографическая	I				
пленка Agfa	а Шт	2	282,61	1130,44	
Structurix D4 NIF					
Ванночки для	I IIIm	2	200	400	
проявки	11111		200	400	
Перчатки	Шт	1	20	20	
Итого: 1619					

Таблица 20 – Материальные затраты

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = \coprod_{\mathcal{D}} P \cdot F_{ob}, \tag{4.3}$$

где $\mathcal{U}_{_{3,n}}$ – тариф на промышленную электроэнергию (270 коп за 1 кВт·ч); P – мощность оборудования, кВт; $F_{_{o\delta}}$ – время использования оборудования, ч.

При выполнении работы использовались:

N⁰	Прибор	Р, кВт	F _{об} , ч
1	Бетатрон	2	25,47
2	Детектор	0,3	25,47
3	Ноутбук	0,09	200

Таблица 21 – Приборы, используемые при работе

$$E_{I} = P \cdot F_{oo} = 2 \cdot 25,47 = 50,94 \,\kappa Bm \cdot u; \tag{4.4}$$

 $E_2 = 64 \, \kappa Bm \cdot 4;$

 $E_{3}=1,8\,\kappa Bm\cdot y.$

Стоимость потраченной энергии:

$$C = 2,70 \cdot (50,94 + 7,64 + 1,8) = 163,03 \text{ pyb.}$$

$$(4.5)$$

Расчет основной заработной платы:

$$\boldsymbol{\beta}_{3\Pi} = \boldsymbol{\beta}_{_{\mathcal{O}CH}} + \boldsymbol{\beta}_{_{\partial ON}}, \qquad (4.6)$$

где 3_{ocn} – основная заработная плата; 3_{don} – дополнительная заработная плата (10 % от 3_{ocn}).

$$\boldsymbol{\beta}_{_{OCH}} = \boldsymbol{\beta}_{_{\partial H}} \cdot \boldsymbol{T}_{_{p}}, \qquad (4.7)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником; $3_{_{\partial H}}$ – среднедневная заработная плата работника:

$$3_{_{\partial H}} = \frac{3_{_{_{\mathcal{M}}}} \cdot M}{F_{_{\partial}}}, \qquad (4.8)$$

где $3_{_{M}}$ – месячный должностной оклад работника; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при шестидневной неделе M = 10,4); $F_{_{\mathcal{A}}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала ($F_{_{\mathcal{A}}} = 179$).

$$3_{_{M}} = 3_{_{TC}} \cdot k_{_{p}}, \tag{4.9}$$

где 3_{TC} – заработная плата согласно Положению по оплате труда; $k_{\rm p}$ – районный коэффициент ($k_{\rm p}$ = 1,3 для Томска) [38].

Таблица 22 – расчет основной заработной платы

Исполнители	<i>З_{тс}</i> , руб	k_{p}	<i>З</i> ", руб	$\mathcal{B}_{_{\partial H}}$,	T_{p} ,	<i>З_{осн}</i> , руб
				руб	раб.дн.,	
					мес.	
Руководитель	29744	1,3	38667,2	2247	24 дня	53928
Студент	2300	-	2300	-	5 мес	11500
					V	Итого: <i>З_{осн}</i> =65428

Отчисления во внебюджетные фонды:

$$\boldsymbol{\mathcal{B}}_{\scriptscriptstyle{\boldsymbol{\mathcal{G}}\boldsymbol{\mathcal{H}}\boldsymbol{\mathcal{O}}\boldsymbol{\mathcal{O}}}} = \boldsymbol{k}_{\scriptscriptstyle{\boldsymbol{\mathcal{G}}\boldsymbol{\mathcal{H}}\boldsymbol{\mathcal{O}}}} \cdot (\boldsymbol{\mathcal{B}}_{\scriptscriptstyle{\boldsymbol{\mathcal{O}}\boldsymbol{\mathcal{H}}\boldsymbol{\mathcal{H}}}} + \boldsymbol{\mathcal{B}}_{\scriptscriptstyle{\boldsymbol{\mathcal{O}}\boldsymbol{\mathcal{O}}\boldsymbol{\mathcal{H}}}}), \qquad (4.10)$$

где $k_{_{eneo}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды ($k_{_{eneo}} = 0,27$).

$$B_{\text{gueb}} = (53928 + 5392, 8) \cdot 0,27 = 16016, 6.$$

Накладные расходы:

$$\boldsymbol{\beta}_{\scriptscriptstyle \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\kappa}\boldsymbol{\beta}} = (\boldsymbol{\beta}_{\scriptscriptstyle \boldsymbol{o}\boldsymbol{c}\boldsymbol{\mu}} + \boldsymbol{\beta}_{\scriptscriptstyle \boldsymbol{\partial}\boldsymbol{o}\boldsymbol{n}} \) \cdot \boldsymbol{k}_{\scriptscriptstyle \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{p}}, \tag{4.11}$$

где $k_{_{np}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы ($k_{_{np}} = 80 - 100\%$).

Таблица 23 – расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, руб
Материальные затраты	1782,3
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	65428
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей	5392,8
темы	
Отчисления во внебюджетные фонды	16016,6

Накладные расходы	47456,5
Бюджет затрат	135896,22

Выводы

При планировании научно-исследовательской работы был произведен подсчет бюджета исследования. В процессе формирования бюджета были использованы группировки по материальным затратам (1782,3руб), затратам по основной заработной плате исполнителей тем (65428 руб), затратам по дополнительной заработной плате (5392,8 руб), отчислениям во внебюджетные фонды (17796,3 руб) и накладным расходам (47456,5 руб). Всего бюджет составил 137856,04 руб. Данная оценка коммерческой ценности необходима, чтобы представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

5 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана ЭТО система законодательных, труда социальноэкономических, организационных, технологических, гигиенических И лечебно-профилактических мероприятий И средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [39].

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого работающего, в на определенных условиях, приводит заболеванию К ИЛИ снижению трудоспособности.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

На инженера, работа которого связана с моделированием на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические:

микроклимат;

шум;

статическое электричество;

электромагнитное поле низкой чистоты;

освещённость;

наличие излучения;

- психофизиологические

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

Таблица 24 - Основные элементы производственного процесса,

Наименовани	е видов	ФАКТО	Нормативные	
работ и пара	метров	ГОСТ 12.0.003	документы	
производств	енного	Вредные Опасные		
процесса				
Рабочее	место	Повышенный		Нормы
находится на	кафедре	уровень		радиационной

формирующие опасные и вредные факторы

ТИЭФ НИИ ТПУ в	ионизирующих		безопасности (НРБ-
учебном корпусе №	излучений в		99/2009). СП
19.	рабочей зоне		2.6.1.2523-09.
Исследование			
покрытий из			
оксидов/или			
оксинитридов титана			
полученных методом			
реактивного			
магнетронного			
распыления на			
установке УВН-			
200МИ			
		D =21000	FOCT 12 1 029 92
		электри-	100112.1.038-82
		ческий ток	ССБТ. Электро-
			безопасность

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на работающих

5.2.1 Требования к ПЭВМ и организация работы организационные мероприятия

Персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и

производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

Технические мероприятия.

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства.



Рис. 45 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

а – зона максимальной досягаемости рук;

 δ – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в – зона легкой досягаемости ладони;

г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: Дисплей размещается в зоне *a* (в центре); Клавиатура – в зоне *c*/*d*; Системный блок размещается в зоне *б* (слева); Принтер находится в зоне *a* (справа); Документация: в зоне легкой досягаемости ладони – *в* (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 *мм*. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 *мм*. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 *мм* и длиной не менее 1400 *мм*. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 *мм*, шириной – не менее 500 *мм*, глубиной на уровне колен – не менее 450 *мм* и на уровне вытянутых ног – не менее 650 *мм*.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 *мм*. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 *мм*; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 *мм*. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 D к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 D. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 *см*;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 D. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели. При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

5.2.2Условия безопасной работы

Производственный шум.

При работе форвакуумного и турбомолекулярного насосов, а также вентиляции возникает производственный шум. Воздействие шума на организм человека вызывает негативные изменения, прежде всего в органах слуха, нервной и сердечно-сосудистой системах. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях лабораторий с шумным оборудованием, составляет 75 дБА. Зоны с уровнем звука или эквивалентным уровнем звука выше 80 дБА обозначены знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026. Рекомендуется использовать следующие средства:

коллективной защиты: акустические экраны, выгородки, объемные поглотители звука, виброизолирующие опоры;

средства индивидуальной защиты: специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски.

Микроклимат.

При работе компонентов установки, а также охлаждающего оборудования происходит изменение микроклимата в помещении. В соответствии с [40], параметрами, характеризующими микроклимат являются:

температура воздуха;

температура поверхностей (учитывается температура поверхностей ограждающих конструкций, устройств (экраны и т.п.), а также технологического оборудования или ограждающих его устройств);

относительная влажность воздуха;

скорость движения воздуха.

Выполняемые работы относятся к Іб категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121-150 *ккал/ч* (140-174 *Bm*), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает 45 ^{o}C .

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 25.

Таблица 25 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Контролируемые	Оптимальные нормы для		Допустимые нормы для рабочего	
показатели	рабочего места		места	
	В холодный и	В теплый	В холодный и	В теплый
	переходный	период года	переходный	период года
	периоды года		периоды года	
Температура, °С	20-23	22-25	19-25	23-28

Относительная	40-60	40-60	не более 75	не более 55
влажность, %				(при 28°С)
Скорость движения	не более 0,2	не более 0,2	не более 0,2	не более 0,5
воздуха, м/с				

Для создания оптимальных метеорологических условий в помещениях применяют кондиционирование воздуха – автоматическое поддержание в помещениях заданных оптимальных параметров микроклимата и чистоты воздуха независимо от изменения наружных условий и режимов внутри помещения. Системы вентиляции служат для удаления из помещения загрязненного и (или) нагретого воздуха и подачи в него чистого. Системы кондиционирования воздуха обеспечивают создание и автоматическое поддержание в помещении заданных параметров воздушной среды независимо от меняющихся метеоусловий.

В холодное время года для поддержания в помещении оптимальной температуры воздуха применяется отопление.

5.3 Расчет искусственной освещенности

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

Основной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости.

Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) освещения и комбинированного (общего и местного) освещения. При учете особенностей

процесса работ с установкой МИБ-4 (ТПУ, Россия) [МИБ-4 (не требует освещения для работ высокой точности) допускается применение системы общего равномерного освещения.

Для освещения помещения используются светильники для ламп ЛХБ типа ОД (мощность 15 *Bm*).

Высота помещения: Н = 3800.

Расстояние светильников от перекрытия: $h_c = 400$.

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3800 - 400 = 3400 \tag{5.1}$$

Высота рабочей поверхности над полом: h_{pn} = 800.

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:



Рис. 46. Схема размещения светильников в помещении

Для двухламповых светильников ОД при одиночной установке или при непрерывных рядах из одиночных светильников в соответствии с требованиями наименьшая допустимая высота подвеса над полом составляет 3,5 *м*. Рассчитанная величина h = 2600 мм не соответствует требованиям. В целях создания благоприятных зрительных условий на рабочем месте и для борьбы со слепящем действием источников света необходимо использовать двухламповые светильники ШЛД или ШОД (наименьшая допустимая высота подвеса над полом: 2,5 *м*).

Расстояние между соседними светильниками: L = 800 мм;

(5.2)

Расстояние от крайних светильников до стены: l = 270 мм.

Расстояние от крайних светильников до стены является оптимальным, так как рекомендуемая величина равна $\frac{L}{3} = \frac{800}{3} = 267$ *мм*.

Интегральный критерий оптимальности расположения светильников является величина $\lambda = L/h$. При идеальном расположении светильников ОД величина должна составлять 1,4 *м*.

Оптимальное расстояние между светильниками L должно составлять:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,6 = 3,64 \text{ M},\tag{5.3}$$

что соответствует настоящему расположению светильников.

Расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 * 25, 2 * 1.5 * 1.1}{6 \cdot 0, 42} = 4950 \text{ Лм},$$
(5.4)

где:

Нормируемая минимальная освещенность (по СНиП 23-05-95): $E_{\mu} = 300$ лк (разряд зрительной работы V: малой точности);

Площадь освещаемого освещения: $S = 25,2 \, \text{м}^2$;

Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, наличие в атмосфере дыма, пыли: *К*₃ = 1,5 (помещение с малым выделением пыли);

Коэффициент неравномерности освещения: Z=1,1 (для люминесцентных ламп);

Число ламп в помещении: N = 6;

Коэффициент использования светового потока: $\eta = 42$.

Световой поток лампы ЛХБ типа ОД (15 *Bm*) составляет 820 *Л*м. Расчет искусственного освещения показал, что световой поток от 6 ламп 4920 *Лм*.

5.4 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды

При выполнении работы возможно воздействие следующих опасных производственных факторов:

Электрическое напряжение.

Пожаровзрывоопасность.

5.4.1 Электробезопасность

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 *Гц* (6-16 *мА*). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Согласно [41] электробезопасность обеспечиваться должна конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным вредным воздействиям И электрического И электромагнитных полей, тока И соответствовать требованиям электробезопасности.

Помещения разделяются на три класса опасности: без повышенной опасности, и повышенной опасностью, особо опасные И наружные ПУЭ 7.4 электроустановки. Согласно «Правила устройства электроустановок» помещение, в котором находится установка, относится к помещениям без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность. К таким условиям относятся: сырость (влажность более 75 %), токопроводящей пыли, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.); (выше $^{\circ}C$); высокие температуры 35 возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей технологическим

аппаратам, механизмам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия [42]:

 содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;

- своевременно проводить техническое обслуживание;

- соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;

- проводить инструктаж для работников [43].

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

- изоляция токоведущих частей;

- малое напряжение в электрических цепях;

- защитное заземление, зануление, защитное отключение;

применение разделяющих трансформаторов;

 использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;

- средства индивидуальной защиты и предохранительные приспособления: диэлектрические перчатки, галоши, изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, диэлектрические резиновые ковры, указатели напряжения.

5.4.2 Пожаровзрывобезопасность

Согласно [44], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям

с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;

 наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

• исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

• применение при строительстве и отделке зданий несгораемых или трудно сгораемых материалов;

• правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

• правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения, предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

 обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

• издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

• соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

• правильное размещение оборудования;

• своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).

 Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112.

3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Согласно[45] работники допускаются работе к только после прохождения инструктажа о мерах пожарной безопасности, BO BCEX помещениях вывешены таблички С указанием номера телефона вызовапожарной охраны и таблички с направлением пути эвакуации и план эвакуации.

Согласно [46] в здании, где ведутся работы, предусмотрены инженерно-технические решения, которые обеспечивают в случае пожара эвакуацию людей (аварийные выходы), подачу средств пожаротушения к очагу, есть сигнализация и работает оповещение о пожаре.

Пожарные краны, огнетушители и другая пожарная техника для защиты объектов соответствует (ГОСТ 12.1.004-91 с измен. 21.10.1993 г).



Рис. 47. План эвакуации из рабочего помещения

На рис. 47. представлен план эвакуации из блока «А» аудитории 18 корпуса, где находится бетатрон «МИБ-4». По плану виден основной эвакуационный выход и 3 огнетушителя. В лабораториях расположены огнетушители углекислотный ОУ-2-ВСЕ (переносной огнетушитель, ГОСТ Р 51057-2001, предназначен для защиты помещений производственного и хозяйственного назначения, применения на автомобильном, железнодорожном, речном транспорте и в бытовых условиях в качестве первичных средств самостоятельной локализации пожаров классов B, C и E до 10 000 *B*).

Причинами возникновения пожара могут быть:

- нарушение правил эксплуатации электрического оборудования;
- курение в неустановленных местах;
- перегрузка электрических сетей;
- нарушение правил пожарной безопасности;
- неправильное хранение возгорающихся веществ.

При работе на установке используются баллоны с аргоном и азотом. Эксплуатация баллонов связана с рядом опасных факторов. Наполненный сжатым газом баллон обладает большой энергией, и если в нем образуется отверстия, то газ истекает из него с критической скоростью.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны в [48]. В целях безопасности, выполнены общие правила эксплуатации баллонов:

1. Баллоны установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, а также защищены от падения на них сверху каких либо предметов.

2. Баллоны с газом, устанавливаемые в помещении находятся от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее 1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0,1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей.

3. Выпуск баллона газов ИЗ производится через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет. Камера низкого давления редуктора имеет манометр предохранительный И пружинный клапан, отрегулированный на соответствующее давление в емкости; во всех случаях открывать и закрывать вентиль баллона необходимо медленно.

5.5 Радиационная безопасность

При работе ускорителя согласно [49] основными факторами радиационной опасности являются:

выведенный из ускорителя пучок ускоренных электронов;

тормозное излучение, возникающее при взаимодействии ускоренных электронов с мишенью, элементами ускорителя, а также конструкционными и другими материалами в рабочей камере (процедурной);

фотонейтроны, возникающие при взаимодействии высокоэнергетического тормозного излучения с ядрами веществ мишени, элементов ускорителя и окружающей среды;

другие виды ионизирующего излучения, возникающего при взаимодействии электронов и тормозного излучения с ядрами веществ окружающей среды;

снимаемое радиоактивное загрязнение рабочей камеры ускорителя (помещения ускорителя), возникающее в результате активации пыли, металлов, испарения активированных материалов мишени и других узлов ускорителя под действием пучка электронов, проведения радиационных процессов;

радиоактивные газы и аэрозоли, образующиеся при облучении компонентов воздуха и веществ, поступающих в него из облучаемых объектов, а также из активируемой воды, охлаждающей узлы ускорителя;

неиспользуемое рентгеновское излучение от высоковольтной электронной аппаратуры ускорителя.

При работе ускорителя имеют место также и другие физические и химические факторы опасности:

тепловыделение от оборудования и коммуникаций;

озон и окислы азота, образующиеся в результате радиолиза воздуха под действием ионизирующего излучения ускорителя;

электромагнитные поля высоких и сверхвысоких частот, создаваемые системами питания ускорителей;

шум, создаваемый аппаратурой ускорителей;

токсические вещества, выделяющиеся при облучении различных веществ;

высокое напряжение;

постоянные электрические и магнитные поля;

открытые движущиеся элементы оборудования, машин и механизмов.

В зависимости от энергии ускоренных электронов ускорители электронов подразделяются на две группы:

I группа - ускорители с максимальной энергией ускоренных электронов не более 10 *МэВ*. При такой энергии электронов фотоядерные реакции возможны лишь с отдельными изотопами, и наведенная активность окружающей среды практически не представляет опасности для здоровья людей.

II группа - ускорители с максимальной энергией ускоренных электронов более 10 *МэВ*, но не более 100 *МэВ*. В этом случае фотоядерные реакции возможны с большинством изотопов, и неизбежна активация элементов конструкции ускорителя и воздуха при работе ускорителя.

Радиационные объекты с ускорителями электронов, энергия которых не превышает 10 *МэВ*, или с медицинскими ускорителями электронов, энергия которых не превышает 25 *МэВ*, следует относить к IV категории потенциальной радиационной опасности, а с ускорителями электронов большей энергии - к III категории.

Бетатрон МИБ-4 относится к I группе ускорителей. Согласно этому ускоритель расположен в отдельном здании в специально оборудованном бункере с выведенным в отдельное помещение пультом управления.

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

При проектировании радиационной защиты учитывают также параметры поля излучения ускорителя, значения которых должны быть приведены в технической документации на ускоритель. К ним относятся: - максимальная энергия ускоренных электронов,

- максимальный ток пучка электронов (поток электронов или плотность потока электронов),

- геометрические размеры поля и направление пучка излучения,

 мощность дозы излучения на установленном расстоянии от выводного окна ускорителя,

- максимальная продолжительность работы ускорителя в режиме излучения за смену и за год для различных энергий и токов пучка,

- защитные свойства индивидуальной защиты ускорителя (при ее наличии).

Индивидуальной радиационной защита ускорителя, состоит ИЗ отдельных съемных защитных блоков И специальные блокировки, исключающие возможность включения ускорителя в случае неправильной установки таких блоков. Имеет световую и звуковую систему оповещения при включенном источнике излучения. Конструкция входа в рабочую камеру обеспечивает защиту примыкающих к нему помещений (имеет лабиринт с дверью и защитная дверь). Вход расположен в месте с наименьшим уровнем излучения в рабочей камере.

Радиационная защита от всех видов ионизирующего излучения, возникающего при работе ускорителя, спроектирована таким образом, что суммарные годовые эффективные дозы облучения персонала и населения не превышают величин, регламентируемые НРБ-99/2009 [50] (20 мЗв/год для персонала группы А, 5 мЗв/год для персонала группы Б и 1 мЗв/год для лиц из населения). При этом следует учитывать максимальное время работы ускорителя в течение года и вводить коэффициент запаса, равный 2.

5.6 Охрана окружающей среды

В данной работе отходами являются бумага, блоки компьютера.

Утилизация блоков компьютера состоит из нескольких технологических операций, включающих в себя:

- демонтаж конструкций и сбор металлических отходов;

- транспортировку отходов на перерабатывающее предприятие;

- проверка металлических отходов (в т.ч. дозиметрическая);

- отделение отходов чёрных металлов от отходов цветных металлов;

- отделение различных примесей неметаллического характера;

- заключительный контроль отходов;

- переработка.

5.7 Защита в чрезвычайных ситуациях

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

Рассмотрим две наиболее типичных чрезвычайных ситуации, которые могут произойти на предприятии.

Первый случай: остановка производства в результате сильных морозов.

Меры по предупреждению ЧС:

1. Повышение устойчивости системы электроснабжения. В первую очередь целесообразно заменить воздушные линии электропередач на кабельные (подземные) сети, использовать резервные сети для запитки потребителей, предусмотреть автономные резервные источники электропитания объекта (передвижные электрогенераторы).
2. Обеспечение устойчивости теплоснабжения за счет запасных автономных источников теплоснабжения, кольцевания системы, заглубления теплотрасс.

3. Обеспечение устойчивости систем водоснабжения (устройство дублирования водопитания, кольцевание системы, заглубление водопроводов, обустройство резервных емкостей и водохранилищ, очистка воды от вредных веществ и т.п.).

4. Обеспечение устойчивости системы водоотведения. Повышение устойчивости системы канализации достигается созданием резервной сети труб, по которым может отводиться загрязненная вода при аварии основной сети. Должна быть разработана схема аварийного выпуска сточных вод В водоемы. Насосы, непосредственно используемые для перекачки загрязненной комплектуются воды, надежными источниками электропитания.

Второй случай: диверсия.

Для обеспечения безопасности работника, предотвращения хищений и проникновении посторонних лиц на предприятие следует использовать ряд мер безопасности:

1. Организовать контрольно-пропускной пункт.

2. Установить системы видеонаблюдения в производственных цехах, а также на всех входах и выходах из здания.

3. Установить оповещающие системы безопасности при несанкционированном проникновении на предприятие в нерабочее время.По данной теме рассматриваются следующие законодательные и нормативные документы:

Инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 10000 В;

ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.1.003-99 ССБТ «Шум. Общие требования эксплуатации».

ГОСТ 12.1.038-82 ССТБ Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление

ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах.

ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.

ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

ГОСТ 12.0.003-74ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

СНиП 21-01-97 Пожарная безопасность зданий и сооружений.

СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение.

Заключение

В данной главе были рассмотрены правила безопасной работы труда при выполнении работ с источниками излучения, а также их последующих исследований. Рассмотрены условия работы с установкой, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы.

Заключение

Проведены измерения размеров фокусного пятна• с помощью эталонов нерезкости IQI и щелевой диафрагмы при различных энергиях ускоренных электронов.

На основе полученных результатов на защиту выносятся следующие положения:

Для измерения параметров фокусного пятна циклических импульсных ускорителей при энергии более 2,5 *МэВ* могут быть использованы методики щелевой диафрагмы и двойного проволочного эталона QIQ Duplex.

При использовании двойного проволочного эталона QIQ Duplex и заявленном значении фокусного пятна в горизонтальном направлении 0,3 *мм* и энергии ускоренных электронов 2,5 *МэВ* размер фокусного пятна составляет 0,24 *мм*, при энергии 3,0 *МэВ* и 3,5 *МэВ* размер фокусного пятна составил 0,19 *мм*.

При использовании в качестве тестового объекта щелевой диафрагмы с диаметром отверстия 0,1 *мм* и энергии ускоренных электронов 2,5 *МэВ* размер фокусного пятна составляет 0,17 *мм*. При энергии 3,0 и 3,5 *МэВ* размер фокусного пятна составляет 0,14 и 0,25 *мм* соответственно. При размере отверстия щелевой диафрагмы 0,2 *мм* и энергии ускоренных электронов 2,5 *МэВ* размер фокусного пятна составляет 0,34 *мм*. При энергии 3,0 *МэВ* и 3,5 *МэВ* размеры фокусного пятна 0,37 *мм* и 0,20 *мм* соответственно.

Список литературы

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

2. Raju, T. N. (1999). "The Nobel Chronicles". The Lancet 354 (9190): 1653–1656. doi:10.1016/S0140-6736(05)77147-6.

3. Вайнберг Э.И. et al. Опыт применения бетатронов НИИ интроскопии при ТПУ в составе компьютерных томографов «Проминтро». 2008.

4. Вайнберг Э.И., Вайнберг И.А. Состояние и перспективы промышленной рентгеновской компьютерной томографии. 2013. Vol. 3, № 87. Р. 18–23.

5. Вайнберг Э.И., Вайнберг И. А. Универсальные компьютерные томографы для отработки технологии и сертификации ответственных изделий. Критерий выбора. «Двигатель» №4 (76). 2011 г.

6. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и диаггностика: Справочник. 2-е изд, и. М.: Машиностроение, 2003. Р. 656.

7. Календер В. Компьютерная томография. М.: Техносфера, 2006. Р. 343.

8. Черняев А.П. Ускорители в современном мире. М.: Издательство Московского университета, 2012. Р. 368.

9. Вайнберг Э.И., Цыганов С.Г. Повышение пространственного разрешения промышленных компьютерных томографов // В мире НК. 2006. Vol. 3, № 44. Р. 40–42.

10. E. I. Vaynberg, V. A. Kasyanov, V. L. Chakhlov, M. M. Stein. Experience of using small-size betatron MIB-5 in the structure of industrial computed tomograph BT-500XA. Industrial Introscopy Co. Ltd, Moscow, Russia, RII at TPU, Tomsk, Russia

11. Физика визуализации изображений в медицине: В 2-х томах. Т.
1:Пер. с англ./Под ред. С. Уэбба. – М.: Мир, 1991. – 408 с.

12. Гольдин Л. Л. Физика ускорителей. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, 144с.

13. В. В. Клюев, Ф Р Соснии. В, А Гусев и др. Неразрушающий контроль с источниками высоких энергий. Энергоатомиздат, 1989.— 176 с.

14. ГОСТ 22091.9-86, Приборы рентгеновские. Методы измерения размеров эффективного фокусного пятна X-ray devices. The methods of measuring effective focus spot size.

15. ГОСТ 22091.0-84, Приборы рентгеновские. Общие требования к измерению параметров X-ray devices . General requirements for measuring of parameters.

16. Klaus BAVENDIEK et al. "New Measurement Methods of Focal Spot Size and Shape of X-ray Tubes in Digital Radiological Applications in Comparison to Current Standards". 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012.

17. European Standard EN 12543-2: "Non-destructive testing Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing – Pinhole camera radiographic method";

18. Москалев В.А., Чахлов В.Л. Бетатроны. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. Р. 267.

19. European Standard EN 12543-1: "Non-destructive testing Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing – Scanning method";

20. В.И. Беспалов, В.Б. Сорокин. Исследование методом Монте-Карло методик определения фокусного пятна тормозного излучения.

21. European Standard EN 12543-3: "Non-destructive testing Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing – Slit camera radiographic method".

22. Gambaccini M. et al. Measurement of focal spot size in a 5.5MeV linac // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier B.V., 2011. Vol. 269, № 10. P. 1157–1165.

23. European Standard EN 12543-4: "Non-destructive testing Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing – Edge method";

24. European Standard EN 12543-5: "Non-destructive testing Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing – Measurement of the effective focal spot size of mini and micro focus X-ray tubes";

25. ASTM international E2903-13 Standard Test Method for Measurement of the Effective Focal Spot Size of Mini and Micro Focus X-ray Tubes.

26. А. И. Болоздыня, И. М. Ободовский. Детекторы ионизирующих частиц и излучений. Принципы и применения: Учебное пособие. Долгопрудный, 2012. – 208 с.

27. А. А. Майоров. Цифровые технологии в неразрушающем контроле. Журнал «В мире НК», №3, 2009.

28. Смит Д. Е. и др. История изобретения приборов с зарядовой связью //Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180. – №. 12. – С. 1357-1362.

29. ISO 17636 -2 Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors. – 53 p.

30. 1998-2015 PerkinElmer Inc. Homepage. The PerkinElmer XRD 1622 AO & AP Flat Panel X-ray Detector. <u>http://www.perkinelmer.com/imaging-</u> <u>components/detectors/xrd-a-si/1622-ao-ap.html#</u>.

31. Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватули-на, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбере-жение: учебно-методическое пособие /Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

32. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.

Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ.
 Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.

34. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.

35. Сущность методики FAST в области ФСА [Электронный ресурс] http://humeur.ru/page/sushhnost-metodiki-fast-v-oblasti-fsa

36. Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК), 4-е издание, 2008 г.

Мазур И.И., Шапиро В.Д., Ольдерогге Н.Г. Управление проектами:
 Учебное пособие. – М.: Омега-Л, 2004. – 664 с.

38. Попова С.Н. Управление проектами. Часть І: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Том-ского политехнического университета, 2009. – 121 с.

39. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция), утверждено Министерство экономики РФ, Министерство финансов РФ № ВК 477 от 21.06.1999 г. [Электрон-ный ресурс]. - Режим доступа. - <u>http://www.cfin.ru/</u>.

40. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.

41. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».

42. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП 2.6.1.2523-09.

43. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

44. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ

45. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

46. ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

47. ПУЭ-7 Правила устройства электроустановок 2009 г.

48. ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

49. ГОСТ 12.0.004-90. ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения.

50. НПБ 105-95 Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности.

51. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений. М.: Гострой России, 1997. – с.12.

52. ППБ 01 – 03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. – М.: Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2003.

43. СанПиН 2.6.1.2573-10. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ.

44. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) Российской Федерации 14 августа 2009 г.