

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
Отделение контроля и диагностики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Совершенствование коллиматоров для систем сканирующей цифровой радиографии

УДК 620.179.152.681.777

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Трофимчук Станислав Алексеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и
ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Данков Артем Георгиевич	к.и.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Анищенко Юлия Владимировна	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Галина Васильевна	к.т.н.		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
Р1	<p>Применять навыки эффективной индивидуальной и командной работы, включая руководство командой, работу по междисциплинарной тематике с учетом этики и корпоративных интересов, в том числе и на иностранном языке.</p>	<p>Требования ФГОС (ОК-3, ОПК- 1, ОПК-3, ПК-12, ПК-16, ПК-17, ПК-18, ПК-22),), СУОС ТПУ (УК-1, УК-3, УК-4, УК-5, УК-6), CDIO Syllabus(2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.2, п. 2.3, п. 2.4, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108Специалист по неразрушающему контролю, 19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса, 19.032 Специалист по диагностике газотранспортного оборудования, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами)</p>
Р2	<p>Применять навыки управления разработкой и производством продукции на всех этапах ее жизненного цикла с учетом инновационных рисков коммерциализации проектов, в том числе в нестандартных ситуациях.</p>	<p>Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОПК-1, ПК-6, ПК -8, ПК-16, ПК-18, ПК-19, ПК-20), СУОС ТПУ (УК-2, УК-6), CDIO Syllabus (2.1, 2.4, 2.5, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.3, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 29.006 Специалист по проектированию систем в корпусе, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)</p>
Р3	<p>Собирать, хранить, обрабатывать, использовать, представлять и защищать информацию при соблюдении требования информационной безопасности и корпоративной культуры.</p>	<p>Требования ФГОС (ОК-1, ПК-4, ПК-17, ПК-19), СУОС ТПУ (УК-5, УК-6), CDIO Syllabus (1.1, 2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI , требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и</p>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
		автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса)
Р4	Применять навыки планирования, подготовки, проведения теоретических и экспериментальных исследований, а также представления и интерпретации полученных результатов.	Требования ФГОС (ОПК-1, ОПК-2 , ПК-1, ПК-2 , ПК-15, ПК-17), СУОС ТПУ (УК-1), Критерий 5 АИОР (п 1.1, п.1.2, п.1.4), CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 4.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами)
Р5	Разрабатывать нормативную, техническую и методическую документацию в области неразрушающего контроля и измерительной техники.	Требования ФГОС (ПК-3, ПК-9 , ПК- 11, ПК-17), CDIO Syllabus (1.2, 4.4), Критерий 5 АИОР (п.1.3, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник)
Р6	Быть готовым к комплексной профессиональной деятельности при разработке инновационных и эффективных методов и средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-6, ПК-8, ПК-10, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-18, ПК-20, ПК-21, ПК-22), СУОС ТПУ (УК-1), CDIO Syllabus (1.2, 1.3, 2.3, 4.1, 4.4, 4.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.3, п. 1.4, п.1.5, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
Р7	Разрабатывать и внедрять энерго- и ресурсоэффективные технологические процессы производства приборных систем с использованием высокотехнологичных средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-8, ПК-10. ПК-11, ПК-12, ПК-14, ПК-21), CDIO Syllabus(1.3, 4.1, 4.2, 4.5. 4.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.5),согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса, 19.032 Специалист по диагностике газотранспортного оборудования)

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
 Уровень образования Магистратура
 Отделение контроля и диагностики
 Период выполнения: (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма предоставления работы:

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ – ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом работы:	04.06.2018
------------------------------	------------

Дата контроля	Название раздела(модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
09.02.2018	Литературный обзор по теме	15
25.02.2018	Подготовка оборудования к проведению экспериментов.	10
24.03.2018	Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения, подготовка материалов к проведению экспериментов.	11
30.03.2018	Проведение экспериментальных исследований	17
15.04.2018	Анализ результатов экспериментов	20
25.04.2018	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	12
30.04.2018	Социальная ответственность	9
18.05.2018	Заключение	6

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Г.В.	к.т.н.		

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
 Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Вавилова Г.В.

 (Подпись) _____
 (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ6А	Трофимчуку Станиславу Алексеевичу

Тема работы:

Совершенствование коллиматоров для систем сканирующей цифровой радиографии	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	30.11.2016, №10267/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	04.06.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Детекторная матрица Perkin Elmer XRD 1621AN/CN . Рентгеновский аппарат РАП-225.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Оценка влияния рассеянного излучения на качество контроля. 2. Разработка алгоритма выбора рациональных параметров целевого коллиматора. 3. Финансовый менеджмент, ресурсо-эффективность и ресурсосбережение. 4. Социальная ответственность 5. Заключение и выводы
Перечень графического материала	1. Презентация, выполненная в MS PowerPoint
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультанты
1. Литературный обзор; 2. Материалы и методы исследования; 3. Экспериментальная часть; 4. Заключение.	Осипов Сергей Павлович
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и	Данков Артем Георгиевич

ресурсосбережение.	
6. Социальная ответственность.	Анищенко Юлия Владимировна
7. Немецкий язык	Щеголихина Юлия Викторовна
Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
2. Влияние рассеяния на смещение информационных характеристик полей фотонного излучения	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	30.09.2018
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Трофимчук Станислав Алексеевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ6А	Трофимчуку Станиславу Алексеевичу

Школа	ИШНКБ	Отделение	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования данной работы является коллиматор для систем сканирующей цифровой радиографии.
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.	Рентгеновское излучение, повышенный уровень электромагнитного излучения, электрический ток
---	--

2. Экологическая безопасность:	Процесс исследования не влияет каким-либо образом на окружающую среду, так как не имеет каких-либо расходуемых материалов, которые могли бы оказать влияние на окружающую среду, во время исследования.
---------------------------------------	---

3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Пожары. Удары электрическим током при эксплуатации оборудования. Тушение оборудования только углекислотным, пенным или порошковым огнетушителем.
--	--

4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Допускаются к работе с устройством лица не моложе 18 лет, не имеющие противопоказаний по здоровью, прошедшие инструктаж по технике безопасности и пожарной безопасности.
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Юлия Владимировна	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Трофимчук Станислав Алексеевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ6А	Трофимчуку Станиславу Алексеевичу

Инженерная школа	ИШНКБ	Отделение	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; наблюдение.
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	1. Структура работ в рамках научного исследования 2. Определение трудоемкости выполнения работ 3. Выполнение SWAT– анализа проекта. 4. Оценка готовности проекта к коммерциализации.
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	1. Разработка графика проведения научного исследования 2. Расчет бюджета научно-технического исследования (НТИ)
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	1. Оценка сравнительной эффективности разработки

Перечень графического материала:

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Альтернативы проведения НИ 3. График проведения и бюджет НИ 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ
--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Данков А.Г.	К.И.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Трофимчук С.А.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 142 с., 16 рисунков, 19 таблиц, 70 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: цифровая радиография, рентгеновская вычислительная томография, рентгеновское излучение, тормозное излучение, коллиматоры, сцинтилляционный детектор, радиационный контраст, пространственное разрешение.

Объектом исследований являются системы сканирующей цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии.

Предмет исследования – первичные и вторичные коллиматоры в системах цифровой радиографии.

Цель работы – исследовать влияние конструкции и параметров коллиматоров на качество систем цифровой радиографии и на основе проведённых исследований разработать рекомендации по совершенствованию коллиматоров для систем цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии.

Предложена и апробирована методика оценки влияния излучения, рассеянного в объекте контроля, на качество контроля методами цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии.

Обоснованы рекомендации по выбору конструкции щелевых коллиматоров в системах цифровой радиографии.

Разработан алгоритм и программа моделирования переноса рентгеновского излучения в геометрии ограничения широкого пучка методом Монте-Карло. Произведено сравнение результатов вычислительного и натурального моделирования.

Оглавление

Введение.....	16
1 Обобщённая модель радиометрических измерений в цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии	22
2. Влияние рассеяния на смещение информационных характеристик полей фотонного излучения	30
2.1 Оценка эффективности щелевой коллимации радиометрического детектора.....	30
2.2 Оценка эффективности щелевой коллимации высокоэнергетического источника тормозного излучения	35
2.3 Экспериментальная оценка энергетического коэффициента накопления тормозного излучения	42
2.4 Оценка погрешности оценки ЛКО в РВТ.....	47
3 Алгоритм и программа для оценки эффективности применения коллиматоров.....	55
3.1 Исходные данные для моделирования переноса излучения.....	57
3.2 Формирование пользовательской базы данных по взаимодействию гамма-излучения с веществом	58
3.3 Обобщённый алгоритм моделирования переноса тормозного излучения в объекте контроля	59
3.4 Заключение к разделу 3.....	71
4 Выбор параметров щелевых коллиматоров в ЦР и РВТ	71
4.1 Выбор толщины коллиматора.....	72
4.2 Выбор ширины раскрытия щели коллиматора.....	74
4.3 Конструкции неоднородных коллиматоров.....	75
5. Социальная ответственность	81
5.1 Производственная безопасность.....	81
5.2. Экологическая безопасность	85
5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	85

5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	86
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	88
6.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	88
6.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	89
6.3 SWOT-анализ	90
6.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	93
6.5. План проекта	95
6.6. Бюджет научного исследования	96
6.6.1. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ	97
6.6.2 Расчет основной заработной платы.....	97
6.6.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).	101
6.6.4 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями.....	102
6.7. Заключение по разделу	103
Заключение	104
Список использованных источников	105
Приложение А	114
Приложение Б.....	134

Список сокращений и обозначений

Сокращения

ЦР – цифровая радиография

РВТ – рентгеновская вычислительная томография

ОК – объект контроля

ТО – тестовый объект

РИ – рентгеновское излучение

ИРИ – источник рентгеновского излучения

ИТИ – источник тормозного излучения

ДРИ – детектор рентгеновского излучения

ДТИ – детектор тормозного излучения

КД – комбинированный детектор

СД – сцинтилляционный детектор

АН – атомный номер

ЭАН – эффективный атомный номер

ЭР – эффективность регистрации

ФП – фотоприёмник

ППД – полупроводниковые детекторы

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ПК – производительность контроля

НРБ – нормы радиационной безопасности

ДСП – длина свободного пробега

ЩК – щелевой коллиматор

ДК – диафрагменный коллиматор

ОСШ – отношение сигнал/шум

ПР – пространственное разрешение

ФГР – функция граничного размытия

РК – радиационный контраст

ФРТ – функция рассеяния точки

ММК – метод Монте-Карло

МКО – массовый коэффициент ослабления излучения

ЛКО – линейный коэффициент ослабления излучения

Обозначения

E_{\max} – максимальная энергия источника рентгеновского или тормозного излучения, МэВ

E – энергия рентгеновского или тормозного фотона

$g(E, E_{\max})$ – энергетический спектр рентгеновского или тормозного излучения

F – фокусное расстояние

ρ – плотность материала ОК

H – толщина материала ОК

Z – атомный номер материала

Z_{eff} – эффективный атомный номер материала ОДК

ρH – массовая толщина

m – МКО ослабляющего материала

h – толщина СД

μ – ЛКО излучения материалом СД

$\varepsilon(E, h)$ – энергетическая зависимость ЭР рентгеновского или тормозного излучения

$I(\varphi)$ – угловое распределение рентгеновского или тормозного излучения

Нормативные документы

1. ГОСТ Р 22.0.01–94. Безопасность в ЧС. Основные положения.
2. ГОСТ Р 22.0.07–95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.
3. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий, соединения сварные, радиографический метод. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.
4. ГОСТ 17038. –79 Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Метод измерения спектрометрической постоянной фотоэлектронного умножителя, используемого для определения сцинтилляционных параметров детекторов
5. ОАО «Газпром» Стандарт Организации «Газораспределительные системы. Методика проведения рентгенографического контроля сварных соединений стальных газопроводов с применением метода цифровой рентгенографии», СТО Газпром 2–2.3–561–2011.
6. ISO 14096–1–2005. Non-destructive testing – Qualification of radiographic film digitisation systems – Part 1: Definitions, quantitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control.
7. ISO 14096–2–2005. Non-destructive testing – Qualification of radiographic film digitisation systems – Part 2: Minimum requirements.
8. EN 14096–1: 2003-08-00 Non-destructive testing – Qualification of radiographic film digitisation systems – Part 1: Definitions, quantitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control; German version EN 14096-1:2003 S-16-188.
9. EN 14096-:2003-08-00 Non-destructive testing – Qualification of radiographic film digitisation systems – Part 2: Minimum requirements; German version EN 14096-2:2003 S-16-189.

Введение

Цифровая радиография (ЦР) и рентгеновская вычислительная томография (РВТ) продолжают оставаться в последнее десятилетие одними из наиболее востребованных и развивающихся методов неразрушающих испытаний. Указанная тенденция связана с потребностями разнообразных отраслей промышленности, транспорта, науки и экономики. Совершенствование методов и средств ЦР и РВТ подкрепляется радикальными изменениями в производстве источников рентгеновского излучения (ИРИ) и источников тормозного излучения (ИТИ), а также детекторов рентгеновского излучения (ДРИ) и детекторов тормозного излучения (ДТИ).

Основные направления изменений в производстве источников излучения связаны:

- с уменьшением размеров излучающих поверхностей;
- с увеличением мощности излучения;
- с формированием полей излучения, отвечающих задачам контроля;
- с совершенствованием источников непрерывного и импульсного излучения рентгеновского;
- с повышением максимальной энергии рентгеновского излучения;
- с увеличением частоты следования импульсов в источниках импульсного рентгеновского и тормозного излучения и повышением их надёжности и стабильности.

Революционные изменения в технологиях изготовления ДРИ и ДТИ привели к появлению на рынке научного оборудования разнообразных детекторов, отличающихся по материалам и размерам первичных радиационных преобразователей, режимам регистрации излучения, улучшенными временными, энергетическими характеристиками.

Следует заметить, что в отечественной научной литературе продолжают различать понятия «рентгеновское излучение» и «тормозное

излучение» несмотря на одинаковость принципа формирования потоков этих излучений (в результате взаимодействия – торможения пучков электронов) и закономерностей их взаимодействия с веществом.

Упомянутые изменения в ИРИ, ИТИ, ДРИ, ДТИ подкрепляются относительной доступностью аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) с повышенной разрядностью (20, 24) и высокоточных механических систем сканирования (вращения) ОК относительно системы источник – детектор.

Всё перечисленное выше привело к расширению применения методов и систем ЦР и РВТ. Системы ЦР и РВТ в настоящее время применяются для контроля малоразмерных и крупногабаритных объектов живой и неживой природы, техники. Следует отметить одно коренное изменение направления применения анализируемых систем. В последние годы наметился отход от восприятия систем ЦР и РВТ в качестве средств визуализации внутренней структуры ОК к их трансформации в измерительные системы. Существует несколько физических факторов, снижающих качество контроля методами ЦР и РВТ. Среди этих факторов наиболее существенным является значительный вклад фотонов, рассеянных в объекте контроля, в интегральные потоки регистрируемого излучения. Повышающиеся потребительские требования к качеству систем контроля и измерений на основе цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии обуславливают необходимость уменьшения влияния рассеяния на качество контроля и измерений для анализируемых систем. Существуют несколько путей уменьшения упомянутого влияния. Ряд научных коллективов продолжает развивать направление, которое условно можно назвать математическим или алгоритмическим подходом. Этот подход основан на введении в процедуру обработки информации в ЦР и РВТ дополнительных калибровок. Алгоритмический подход применим для контроля промышленных объектов. Спецификой промышленных объектов является строгая определённость их внутренней структуры, конечное число фрагментов из различных материалов. Совершенство технологии

изготовления исключает множественность дефектов. Неопределённость же внутренней структуры ОК не позволяет устранить или значительно уменьшить влияние рассеяния на качество контроля и измерений. Неопределённость внутренней структуры характерна для природных объектов, произведений искусства, исторических артефактов и объектов досмотрового контроля. Последний класс объектов представляет особый интерес для обеспечения безопасности. Второе направление уменьшения вклада рассеянного излучения связано с техническими подходами, способствующими этому уменьшению. Среди таких подходов можно выделить:

- рациональный выбор максимальной энергии излучения;
- частичная дискриминация регистрируемых фотонов по энергии;
- коллимация источника и (или) детектора излучения.

Подход, базирующийся на рациональном выборе энергии излучения, пригоден для диапазона энергий фотонов, в котором превалирующим эффектом взаимодействия фотонов с веществом является фотоэффект. Указанный факт ограничивает область применения такого подхода малоразмерными объектами.

В подходе на основе частичной дискриминации регистрируемых фотонов по энергии используется то, что рассеянный фотон имеет меньшую энергию по сравнению с исходным фотоном. Такой подход для источников рентгеновского и тормозного излучения обладает малой эффективностью, так как энергетические спектры указанных источников являются непрерывными, а дискриминатор отсекает не только рассеянные фотоны малой энергии, но и первичные фотоны малой энергии. Для импульсных источников излучения описываемый подход невозможно реализовать.

На практике наиболее частым и достаточно эффективным подходом, позволяющим снизить влияние рассеяния на качество контроля методами ЦР и РВТ, является подход, связанный с ограничением пучка рентгеновского или тормозного излучения. Указанное ограничение достигается применением

коллиматоров. Используют коллиматоры ИРИ, ИТИ и ДРИ, ДТИ. Причём наиболее эффективно одновременное применение коллиматоров и источника излучения (первичный коллиматор), и детектора (вторичный коллиматор). Существуют различные конструкции коллиматоров, среди которых выделяют щелевые коллиматоры и коллиматоры диафрагменного вида. Коллиматоры с малым размером диафрагмы традиционно называют пинхольными коллиматорами.

Расширение областей применения методов ЦР и РВТ в сторону увеличения размеров ОК и дополнение систем измерительными функциями обуславливает **актуальность решения задач, связанных с выбором конструкции, материалов и размеров коллиматоров.**

Предмет исследований – первичные и вторичные коллиматоры в системах цифровой радиографии.

Объект исследований – системы сканирующей цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии

Цель работы – исследовать влияние конструкции и параметров коллиматоров на качество систем цифровой радиографии и на основе проведённых исследований разработать рекомендации по совершенствованию коллиматоров для систем цифровой радиографии.

Для реализации указанной цели работы решаются следующие **основные задачи:**

- методом вычислительного эксперимента исследовать влияние рассеяния на качество цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии крупногабаритных объектов контроля;
- разработать способ оценки энергетического коэффициента накопления рентгеновского излучения методом цифровой радиографии;
- сопоставить результаты вычислительных и натуральных экспериментов по оценке энергетического коэффициента накопления для щелевой коллимации источника тормозного излучения;

– разработать рекомендации по выбору конструкции и параметров щелевых коллиматоров системы цифровой радиографии на основе линейки детекторов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, планирования физического эксперимента, системного анализа, обработки изображений, корреляционного анализа и статистической обработки результатов экспериментальных исследований.

Научная новизна:

– исследовано влияние рассеяния на качество цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии крупногабаритных объектов;

– разработан способ оценки энергетического коэффициента накопления рентгеновского излучения методом цифровой радиографии;

– сопоставлены результаты вычислительных и натуральных экспериментов по оценке энергетического коэффициента накопления для щелевой коллимации источника тормозного излучения;

– разработаны рекомендации по выбору конструкции и параметров щелевых коллиматоров системы цифровой радиографии на основе линейки детекторов.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученная в результате исследований информация позволит оценить ожидаемое качество цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии, предложить рекомендации по выбору конструкции и параметров коллиматоров линейки детекторов, исходя из предельного значения энергетического коэффициента накопления.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований использованы для оценки энергетического коэффициента накопления для системы высокоэнергетической цифровой радиографии на основе источника тормозного излучения МИБ–9 при вариации максимальных энергий от 4 до 9 МэВ.

Апробация работы. Основные положения выпускной квалификационной работы докладывались на защите научно-исследовательских работ 2017–2018 годах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- формулы для оценки влияния рассеяния на качество цифровой радиографии и вычислительной томографии крупногабаритных объектов;
- способ оценки энергетического коэффициента накопления рентгеновского излучения методом цифровой радиографии;
- оценки энергетического коэффициента накопления для крупногабаритных объектов для щелевой коллимации источника тормозного излучения;
- рекомендации по выбору конструкции и параметров щелевых коллиматоров линейки детекторов для систем цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии.

1 Обобщённая модель радиометрических измерений в цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии

Системы неразрушающего контроля с использованием источников фотонного излучения (источники гамма-излучения, рентгеновские аппараты, бетатроны, линейные ускорители) широко применяются в различных отраслях жизнедеятельности человека [1–12]: промышленности; атомной энергетике; строительстве; транспорте; медицине. За последние десятилетия разрешены многие технические, методологические аспекты основных реализаций радиационных методов – цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии. Во введении подчёркнуто, что современный уровень развития общества ставит перед неразрушающим контролем сложных объектов новые проблемы, связанные с повышением достоверности, производительности, высоких требований к точности оцениваемых параметров. Решение указанных проблем невозможно без совершенствования методов формирования исходной информации в системах ЦР и РВТ применительно к исследованию сложных по форме и структуре объектов.

На рисунке. 1.1 приведена обобщенная физическая модель сложных объектов контроля, которая с формальной точки зрения представляет собой некий условный трехслойный барьер с однородными и неоднородными слоями различной толщины, причём слои могут включать в себя регулярные или расположенные произвольным образом структурные фрагменты. Задачей контроля является измерение параметров такого объекта или обнаружение и идентификация по некоторым критериям локальных включений. Обобщенная модель описывает и простые и сверхсложные объекты, состоящие из конечного множества структурных фрагментов.

Получение конечных результатов в ЦР и РВТ является информационным процессом, в котором в результате активного воздействия на ОК полей рентгеновского или тормозного излучения, формируется

информация об интегральных или дифференциальных характеристиках ОК: форме; размерах; плотности; эффективного атомного номера.

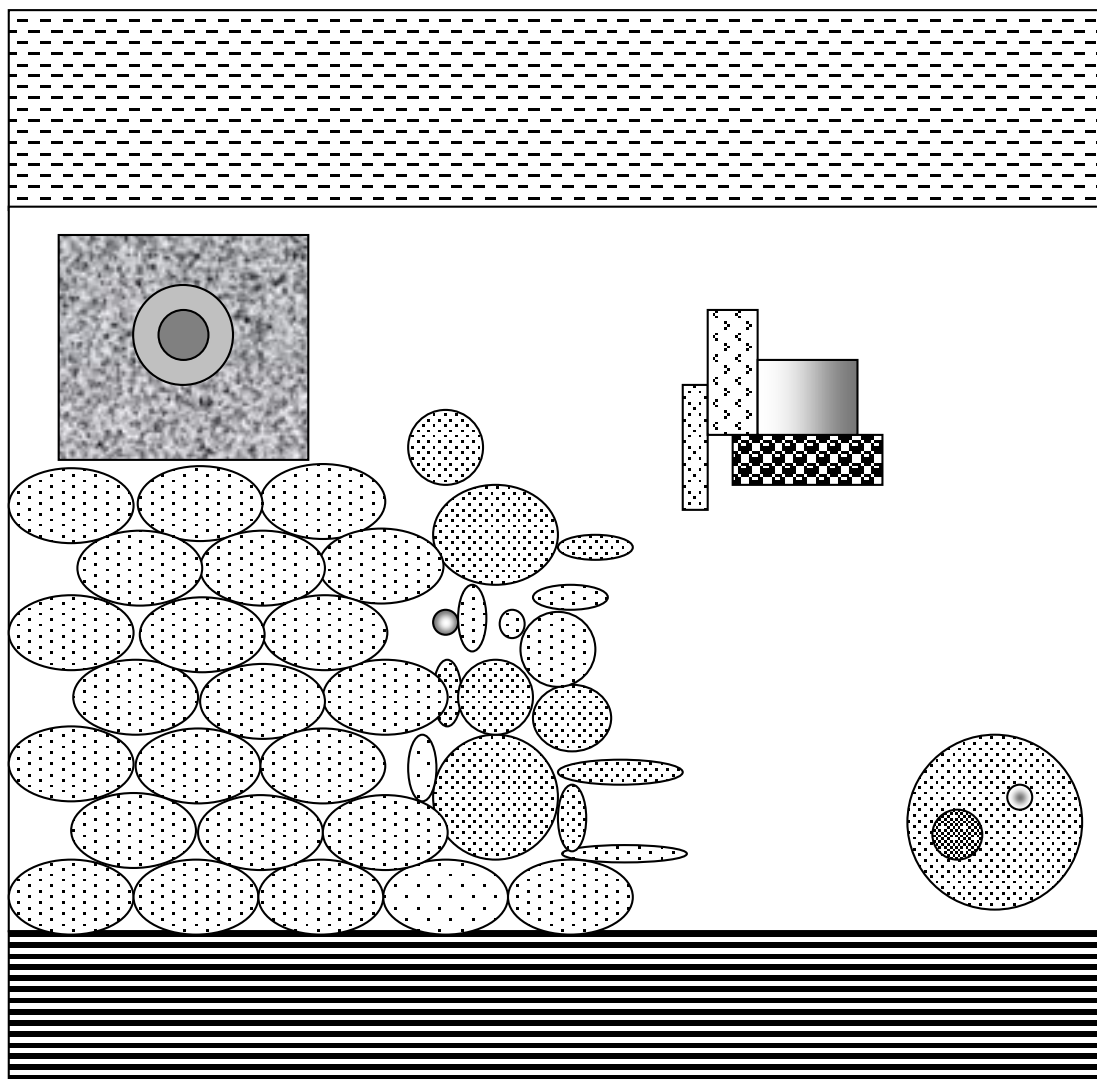


Рисунок 1.1 Обобщенная физическая модель объекта контроля

Исследователя могут интересовать как интегральные характеристики ОК (например, плотность ОК), то есть усредненные по всему объекту или некоторой его «существенной» части, так и дифференциальные (например, распределение плотности по объему), тоже усредненные, но уже по «небольшому» объему ОК.

В нашем случае на объект контроля воздействует поток фотонного излучения, а именно, поток гамма-излучения радионуклидов, рентгеновского излучения или тормозного излучения бетатронов. На рис. 1.2 приведена

обобщенная информационная модель радиометрического контроля.

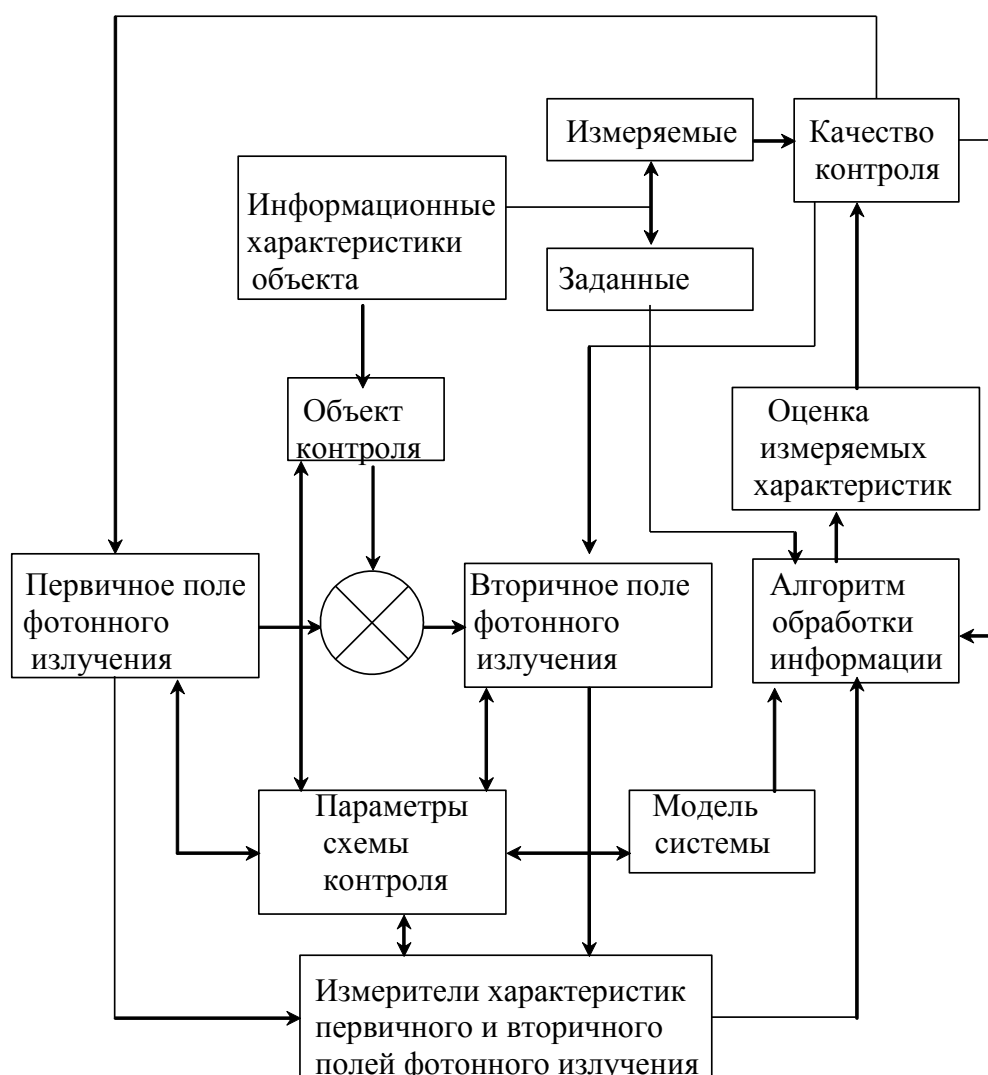


Рисунок. 1.2 Обобщённая информационная модель радиометрических измерений

Информационная модель учитывает параметры схемы контроля (энергетические, геометрические и другие), информационные характеристики ОК, математическую модель системы, алгоритмы обработки информации и качество контроля. Возможность получения тех или иных характеристик ОК связана с энергетическим диапазоном фотонного излучения и техническим способом получения информации о трансформации поля фотонного излучения объектом контроля, например, сканированием объекта коллимированным пучком излучения под различными углами.

На рисунке 1.3 приведены структурная схема, схема просвечивания и

математическая модель системы радиометрического контроля. Идеальная физическая модель радиометрического контроля включает в себя точечный моноэнергетический источник фотонов, измерения проводятся в геометрии узкого пучка, детектор излучения точечный, полного поглощения.

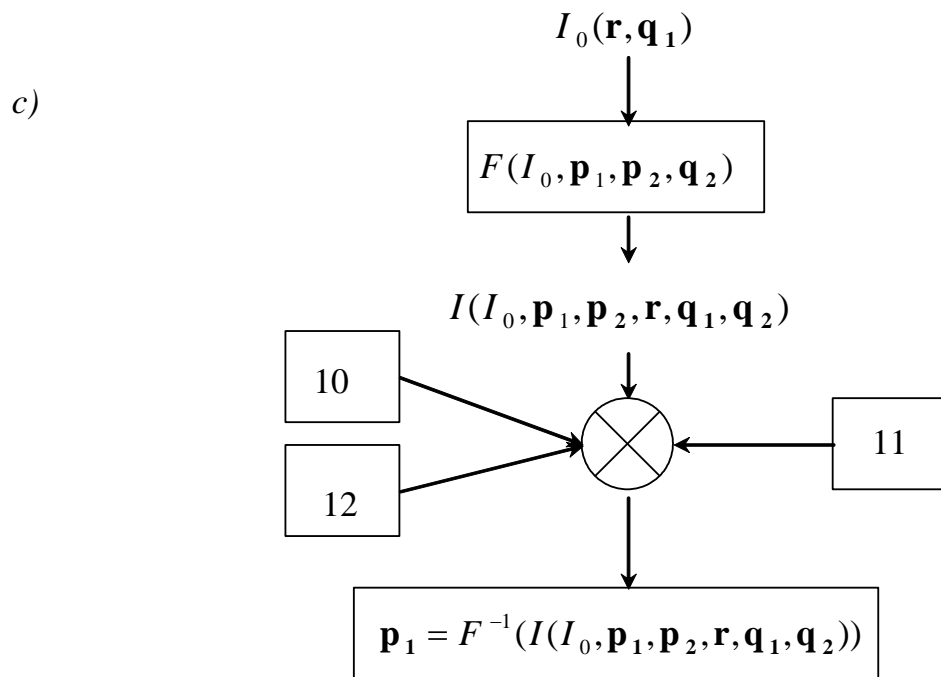
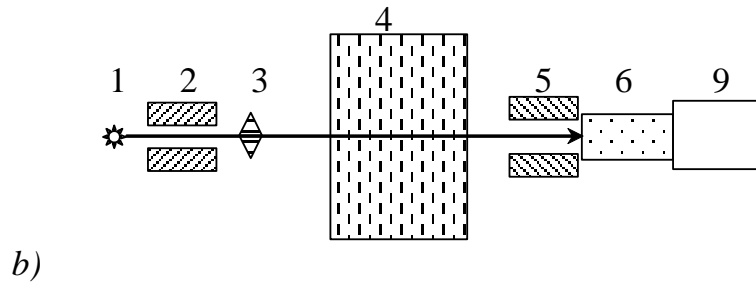
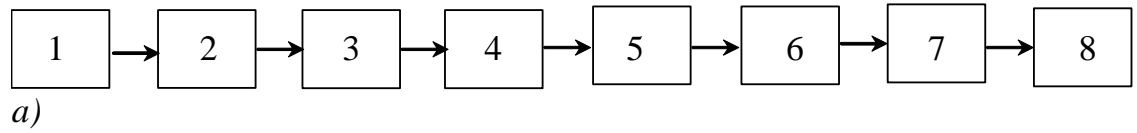


Рисунок 1.3 Структурная схема – *a*, схема просвечивания – *b* и математическая модель системы радиометрического контроля – *c*: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор источника; 3 – выравнивающий фильтр; 4 – объект контроля; 5 – коллиматор детектора; 6 – детектор; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – блок обработки информации; 9 – фотоприемник; 10 – шум, обусловленный статистической природой испускания и регистрации фотонов; 11 – отклонения и шум, вызванные отклонениями и флуктуациями параметров системы контроля; 12 – отклонения, вызванные несоответствием математической и реальной моделей системы.

Математическая модель состоит из уравнения (уравнения трансформации) связи параметров пучков первичного и вторичного излучений и параметров объекта контроля, а также способа обработки радиометрической информации, позволяющего оценить искомые параметры ОК. Уравнение трансформации первичного потока фотонного излучения записывается следующим образом

$$I(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{r}, \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2) = I_0(\mathbf{r}, \mathbf{q}_1)F(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{q}_2), \quad (1.1)$$

где $I_0(\mathbf{r}, \mathbf{q}_1)$ – плотность потока первичного излучения, регистрируемого детектором (системой детекторов) при отсутствии объекта; \mathbf{r} – радиус-вектор, определяющий взаимное геометрическое положение излучающей точки (точек) и точки (точек) детектирования; \mathbf{q}_1 – вектор параметров измерительного комплекса; \mathbf{p}_1 – матрица измеряемых параметров объекта контроля; \mathbf{p}_2 – матрица известных параметров объекта контроля; \mathbf{q}_2 – вектор параметров комплекса и ОК, влияющих на трансформацию первичного потока фотонного излучения; $F(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{q}_2)$ – закон трансформации первичного потока. Отметим, что намеренно употребляем термин «закон трансформации» вместо традиционного термина «закон ослабления», так как функциональная зависимость $F(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{q}_2)$ учитывает не только ослабление излучения, но и его регистрацию. Матрица измеряемых параметров ОК \mathbf{p}_1 может быть скалярной величиной (вырожденный случай), вектором, двухмерным или объемным изображениями.

Уравнение (система уравнений) для нахождения искомых параметров объекта контроля находится из (1.1):

$$\mathbf{p}_1 = F^{-1}(I(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{r}, \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)/I_0(\mathbf{r}, \mathbf{q}_1)). \quad (1.2)$$

На практике измеряемый параметр оценивается по формуле (1.2) с некоторой погрешностью, обусловленной, во-первых – статистической

природой испускания и регистрации фотонного излучения, во-вторых – отклонением (флуктуациями) параметров комплекса и неизмеряемых параметров ОК; в-третьих – неадекватным описанием функциональной зависимости $F(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{q}_2)$. Выражение для погрешности имеет вид:

$$\Delta \mathbf{p}_1 = \tilde{\mathbf{p}}_1 - \mathbf{p}_1 = F^{-1}(\tilde{I}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{q}}_1, \tilde{\mathbf{q}}_2) / I_0(\tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{q}}_1)) - \mathbf{p}_1, \quad (1.3)$$

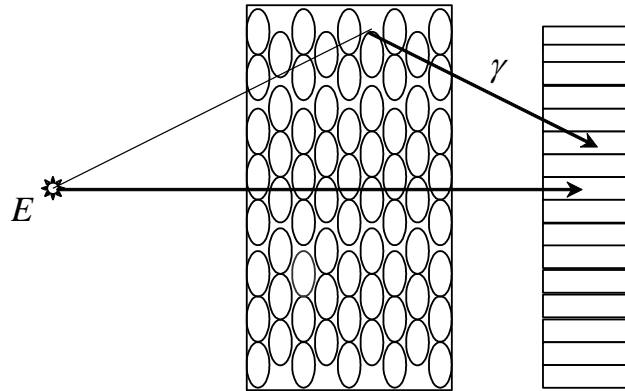
где значок « \sim » указывает на текущее значение параметров.

Параметры системы радиометрического контроля (геометрические, энергетические и т. п.) находятся по исходным данным на проектирование (например: погрешность измерения распределения плотности по объекту контроля; пространственное разрешение; выявляемость локальных включений т. п.), с помощью системы уравнений и неравенств, описывающих влияние физических и технических ограничений на качество контроля, например,

$$\rho(\Delta \mathbf{p}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, I, I_0) \leq \rho(\Delta_0) \quad \mathbf{q}_1 \in \mathbf{Q}_1, \mathbf{q}_2 \in \mathbf{Q}_2, \quad (1.4)$$

где ρ – величина, характеризующая погрешность; Δ_0 – погрешность, задаваемая на стадии технического задания на проектирование; $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ – области значений, которые могут принимать соответствующие параметры. Задача (1.4) включает в себя и то обстоятельство, что выбор части параметров из набора $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2$ может быть осуществлен исходя из минимума погрешности измерения искомым параметров.

Значительная часть прямых задач, связанных с влиянием физических и технических факторов на выходные характеристики систем решена как за рубежом, так и у нас в стране. Одним из таких факторов является рассеяние излучения в ОК. Традиционная схема рассеяния приведена на рисунке 1.4.



Рисунке 1.4 Схема рассеяния фотонного излучения

Обратные же задачи, особенно применительно к контролю сильно рассеивающих сред, что необходимо для научного обеспечения материаловедения для нужд строительства, промышленности, горного дела, медицинской диагностики, исследованы в значительно меньшей степени.

Рассеянное в ОК излучение существенно ухудшает качество контроля. В классической радиографии и интроскопии [13–15] этот факт проявляется в уменьшении контраста от дефекта, подлежащего обнаружению.

В системах, измеряющих параметры объекта (плотность, толщину, концентрацию) наличие рассеянного излучения приводит к смещению в оценке измеряемых параметров. Особую остроту эта проблема приобрела в РВТ, в которой по большому набору проекций восстанавливается изображение сечения объекта контроля [16–17]. Для уменьшения вклада рассеянного излучения в интегральный поток регистрируемого излучения коллимируют как детектор, так и источник излучения. Анализ зависимостей приборного коэффициента накопления излучения от размеров коллиматора источника излучения продолжает оставаться актуальной задачей. Значительный интерес представляет вопрос, каким образом искажение, вносимое рассеянием в ОК в результате сложных алгоритмических преобразований в РВТ [6], [16–17]. К этой же группе задач примыкает вопрос выбора параметров коллиматора, исходя из предельной погрешности

измерения плотности (линейного коэффициента ослабления излучения).

Выполненный в данном разделе анализ научно-технической литературы и представление ранее не решенных вопросов свидетельствует об объективной необходимости достижения цели и решения задач, сформулированных во введении.

2. Влияние рассеяния на смещение информационных характеристик полей фотонного излучения

При проектировании систем ЦР и РВТ необходимо знать вклад рассеянного излучения в суммарную плотность потока энергии излучения, падающего на фронтальные поверхности радиационно-чувствительных объёмов детекторов, так как от величины этого вклада существенно зависит вероятность обнаружения дефектов [18] и точность оценки параметров ОК.

2.1 Оценка эффективности щелевой коллимации радиометрического детектора

Для снижения вклада излучения, рассеянного в объекте контроля, в интегральные сигналы в системах ЦР и РВТ с источниками рентгеновского и тормозного излучений комплексах вычислительной томографии (ВТ) и вычислительной радиографии (РВ) эффективно применяют щелевую коллимацию линеек многоканальных детекторов [19]. Наиболее просто влияние указанного вклада на качество контроля системами ЦР и РВТ может быть оценено для плоских барьеров. В данном случае плоский барьер является достаточно условным понятием. Будем называть часть ОК плоским барьером, если радиус кривизны поверхностей, ограждающих эту часть ОК много меньше ширины раскрытия щелевого коллиматора. Такому определению понятия плоский барьер соответствуют практически все крупногабаритные объекты, естественно при должной ориентации ОК и щелевого коллиматора.

Материалы данного раздела представляют собой обобщение результатов работы [20], которая посвящена исследованию эффективности применения щелевой коллимации детектора. В указанной работе рассмотрены два типа основных геометрических модели источников излучения – точечный изотропный и плоский моно-направленный. Такие геометрические модели используются на начальной стадии проектирования

большинства систем ЦР и РВТ.

На рисунке 2.1 приведена геометрическая схема щелевой коллимации. На рис. 2.1 цифрами обозначены: 1 – источник излучения; 2 – ОК; 3 – имитатор дефекта; 4 – щелевой коллиматор; 5 – радиационно-чувствительный объём сцинтилляционного детектора (СД); 6 – фотоприёмник (ФП). Щелевой коллиматор характеризуется параметрами: размерами отверстия щелевого коллиматора $b \times a$, $b > a$; толщиной коллиматора l . Апертура детектора в системах ЦР и РВТ существенно меньше размеров ОК, поэтому логично наложить следующее ограничение на размеры отверстия щелевого коллиматора – $b/a \gg 1$. Не теряя общности можно считать, что $b \rightarrow \infty$.

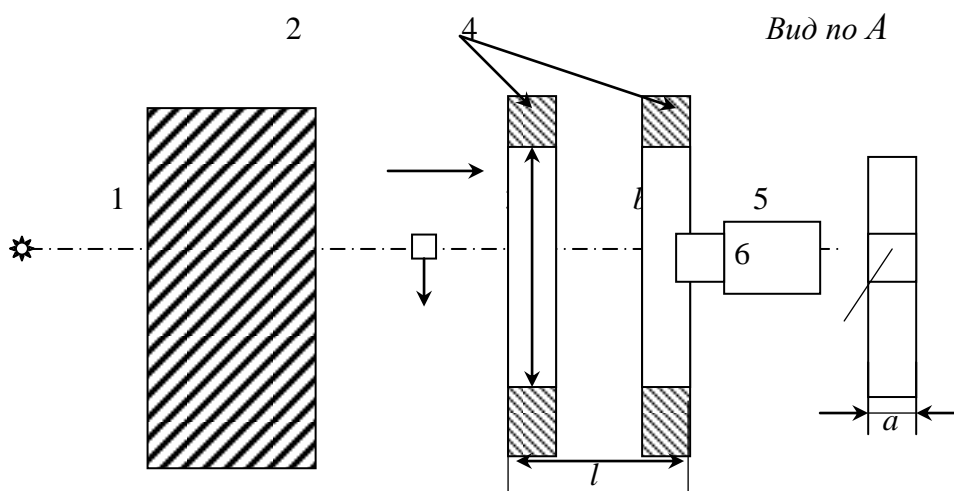


Рисунок 2.1 Геометрическая схема щелевой коллимации

В литературе имеются данные по угловому распределению рассеянного излучения для моноэнергетических источников излучения [21]. Обобщение выражений из [22] для оценки интенсивности рассеянного излучения может быть описано формулой

$$I = \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \left(2\pi \int_0^{\theta_1} \sin \theta \cdot \frac{dI_P(E)}{d\Omega} d\theta + 4 \int_{\theta_1}^{\pi/2} \arcsin\left(\frac{k}{\operatorname{tg}\theta}\right) \cdot \sin \theta \cdot \frac{dI_P(E)}{d\Omega} d\theta \right) dE, \quad (2.1)$$

где $dI_P(E)/d\Omega$ – описания угловых распределений рассеянного излучения для моноэнергетического излучения с энергией E за барьером [23];

$k=a/(2l)$; $\theta_1=\text{arctg}(k)$.

Отметим, что для коллиматоров, состоящих из двух диафрагм, можно не учитывать излучение из стенок коллиматора.

Для точечного изотропного источника формула для расчета углового распределения записывается следующим образом [24]:

$$\frac{dI_P^{T.H.}(E)}{d\Omega} = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i^{T.H.}(E) \exp(-\theta/\theta_i^{T.H.}(E)) / \sin \theta, \quad (2.2)$$

где $n=2$, при $E < 2,75$ МэВ, $n=3$, при $E > 2,75$ МэВ, E – энергия фотонов излучения, падающего на барьер; $C_i^{T.H.}(E)$ – энергетические зависимости нормировочных множителей; $\theta_i^{T.H.}(E)$ – энергетические зависимости характеристических углов.

Для плоского мононаправленного источника, при нормальном падении излучения на барьер, соответствующая формула имеет вид

$$\frac{dI_P^{П.М.}(E)}{d\Omega} = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i^{П.М.}(E) \exp(-\theta/\theta_i^{П.М.}(E)). \quad (2.3)$$

Для большого диапазона углов все члены в сумме (2.3), кроме первого малы, поэтому можно перейти к хорошо известной в литературе [25] экспоненциальной зависимости

$$\frac{dI_P^{П.М.}(E)}{d\Omega} = C^{П.М.}(E) \exp(-\theta/\theta_0(E)).$$

Коэффициент $C^{П.М.}(E)$ энергетическим коэффициентом накопления $B_{\vartheta}(E)$ следующим соотношением

$$2\pi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \frac{dI_P^{П.М.}(E)}{d\Omega} d\theta = B_{\vartheta}(E) - 1.$$

Конечная формула для вычисления $C^{П.М.}(E)$ имеет вид

$$C^{П.М.}(E) = \frac{(B_{\vartheta}(E) - 1)(1 + \theta_0^2(E))}{2\pi\theta_0(E)(\theta_0(E) - \exp(-\pi/2\theta_0(E)))}.$$

Формула (2.1) может быть записана в виде суммы двух интегралов I_1

I_2 . Первый интеграл записывается следующим образом:

$$I_1 = \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \frac{(B_{\text{э}}(E) - 1)(\theta_0(E) - \sin \theta_1(E) \exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) - \theta_0(E) \cos \theta_1(E) \exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right))}{\theta_0(E) - \exp(-\pi/2\theta_0(E))} dE$$

Для второго интеграла I_2 в сумме (2.1) выполняется неравенство $k/\text{tg}(\theta) < 1$, поэтому приближение для вычисления величин I_2 имеет вид

$$I_2 = \frac{2k}{\pi} \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \frac{(B_{\text{э}} - 1) \left(\exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) + \theta_0(E) \exp\left(-\frac{\pi}{\theta_0(E)}\right) - \theta_0(E) \theta_1(E) \exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) \right)}{\theta_0(E) - \exp\left(-\frac{\pi}{2\theta_0(E)}\right)} dE.$$

Полученные формулы позволяют сформировать конечное выражение для оценки приборного энергетического коэффициента накопления для щелевого коллиматора и плоского мононаправленного источника:

$$I = \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \frac{(B_{\text{э}}(E) - 1) \left(\theta_0(E) - (\theta_1(E) + \theta_0(E)) \exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) \right)}{\theta_0(E) - \exp(-\pi/2\theta_0(E))} dE +$$

$$+ \frac{2k}{\pi} \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \frac{(B_{\text{э}} - 1) \left(\exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) (1 - \theta_0(E) \theta_1(E)) + \theta_0(E) \exp\left(-\frac{\pi}{\theta_0(E)}\right) \right)}{\theta_0(E) - \exp\left(-\frac{\pi}{2\theta_0(E)}\right)} dE$$

. (2.4)

Выражение (2.4) легко применить в случае значительных расстояний между источниками и детекторами излучений для оценки энергетического коэффициента накопления при использовании щелевого коллиматора линейки ДРИ или ДТИ, а также для выбора параметров щелевых коллиматоров систем ЦР и РВТ, исходя из потребительских параметров проектируемых систем.

Функции $I^{T.H.}(k)$ для малых расстояний между источником и детектором излучения, то есть для геометрической модели точечного изотропного источника излучения, рассчитанные по формулам (2.1), (2.2) для различных энергий и материалов, приведены на рисунок 2.2. Значения $I^{T.H.}(k)$ нормированы на $B_{\text{э}} - 1$. Эффективность применения щелевых коллиматоров

возрастает с уменьшением энергии падающего излучения, что связано с возрастанием характеристических углов. Эффективность щелевой коллимации существенно снижается при увеличении атомного номера материала изделия. Такой характер зависимости обусловлен соответствующим поведением. Нормированные зависимости $I^{T.H.}(k)$ слабо зависят от толщины контролируемого объекта.

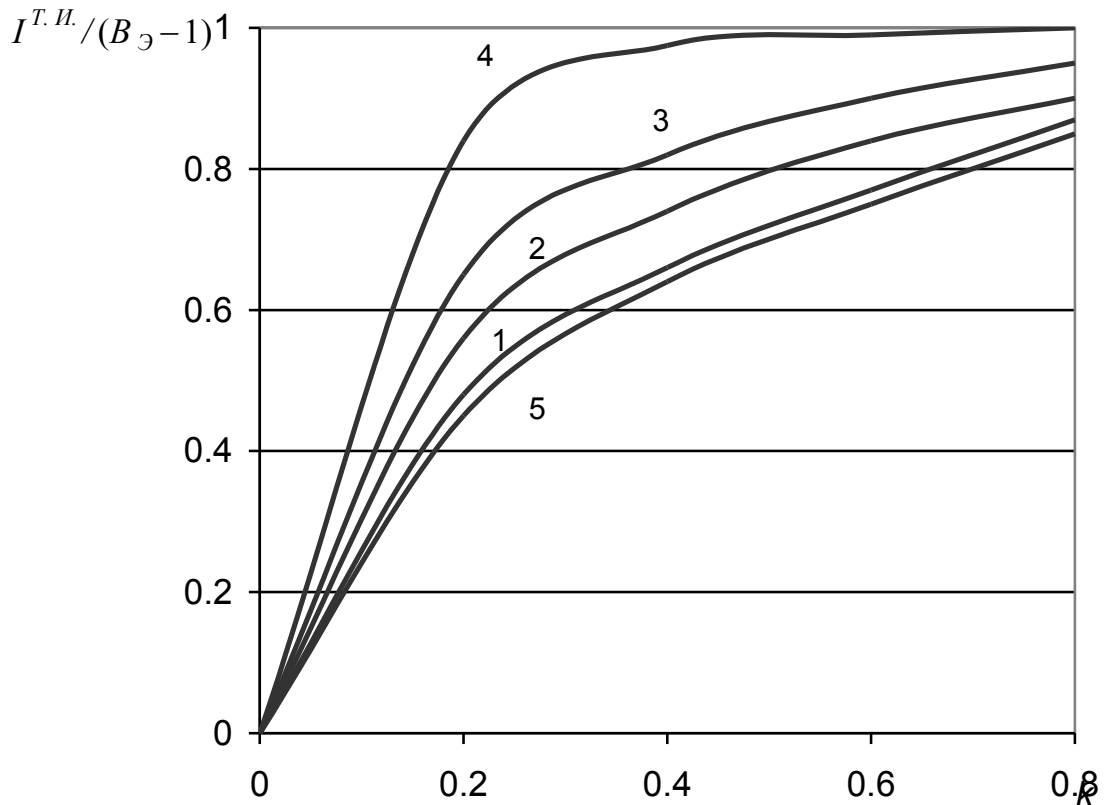


Рисунок 2.2 Зависимость $I^{T.H.}(k)$ для изделий из стали (1, 2, 3), свинца (4), воды (5) и максимальной энергии фотонов E_{\max} , равной 1 (1, 5), 3 (2), 15 МэВ (3,4)

Учитывая асимптотическое поведение $I^{T.H.}(k)$ на практике можно применять аппроксимацию:

$$I^{T.H.}(k) \approx \frac{1}{1 + p/k}, \quad (2.5)$$

где p – параметр, значение которого зависит от максимальной энергии ИРИ или ИТИ и материала барьера. Из анализа расчётов удалось установить, что значение параметра p пропорционально эффективному значению

характеристического угла Коэффициент p пропорционален значению характеристического угла $p \approx 0,3\theta_{0эфф}$. Погрешность аппроксимационной формулы (2.5) для $k < 1/20$ не более 5%, а для $k > 1/20$ – около 12–15%.

Из сказанного выше следует, приборный коэффициент накопления для точечного изотропного источника может быть оценён с помощью выражения

$$B_{II}^{T.I.} \approx 1 + \frac{B_{\text{э}} - 1}{1 + 0,28\theta_{0эфф}/k}. \quad (2.6)$$

Погрешность выражения (2.6) для толщин барьера в д.с.п. $\mu_{эфф}H \leq 3$ – не более 7 %; $\mu_{эфф}H > 3$ – от 10 до 20%. Здесь H – толщина ОК в сантиметрах; $\mu_{эфф}$ – эффективный ЛКО рентгеновского или тормозного излучения для материала ОК.

2.2 Оценка эффективности щелевой коллимации высокоэнергетического источника тормозного излучения

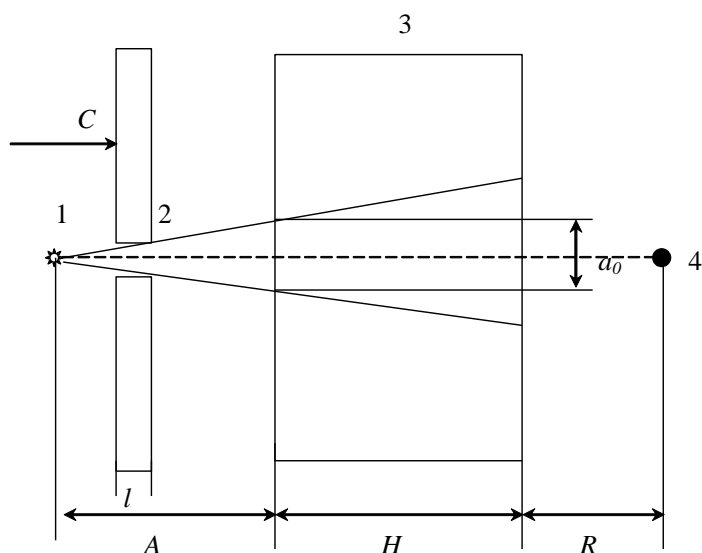
В предыдущем разделе рассмотрен подход к оценке энергетического коэффициента накопления для щелевой коллимации линейки радиометрических детекторов. Выше отмечено, что влияние рассеяния на качество контроля в ЦР и РВТ уменьшают также коллимацией источника излучения [26–27]. В системах ЦР и РВТ, предназначенных для измерительных задач, применяют линейки оптически разделённых детекторов. Для подобных систем эффективно использование щелевых коллиматоров источников и детекторов рентгеновского и тормозного излучения [31]. Контроль крупногабаритных объектов обуславливает необходимость применения линеек детекторов значительной протяжённости. В подобной ситуации масса коллиматора линейки детекторов может быть значительной. В ряде случаев это является недопустимым, поэтому иногда щелевой коллимации щелевой коллимации высокоэнергетического источника тормозного излучения нет альтернативы. Наиболее жестки

ограничения к массе коллиматоров при проектировании мобильных систем досмотрового контроля контейнеров, транспортных средств.

Энергетический коэффициент накопления излучения B_{Σ} наиболее полно характеризует вклад рассеяния в интегральные аналоговые сигналы на выходе единичных детекторов линейки. В последние годы системы ЦР и РВТ применяют для исследования объектов с толщиной по стали в диапазоне от 200 до 300 см, которые ранее считались непригодными к контролю. Такие объекты наиболее характерны для досмотрового контроля. Величина энергетического коэффициента накопления B_{Σ} зависит от большого числа параметров систем ЦР и РВТ. Среди таких параметров следует отметить: максимальная энергия и энергетический спектр ИРИ и ИТИ; максимальная толщина и форма ОК; эффективный атомный номер и плотность материала ОК; угловое распределение; расстояния от источника излучения до ОК и от источника излучения до линейки детекторов; от размеров и материала детекторов. Эффективность коллиматоров источника и линейки детекторов определяется тем, насколько ограничивается эффективный рассеивающий объем объекта контроля – т.е. насколько мал по объёму источник вторичного фотонного излучения. Выше отмечено, что щелевые коллиматоры можно характеризовать двумя параметрами – толщиной l и шириной a . Параметр a называют раскрытием щели коллиматора. Объем источника вторичного излучения (рассеивающий объем) определяется тенью щели на фронтальной поверхности ОК. Поэтому под раскрытием щели коллиматора a будем понимать ширину поля облучения на лобовой поверхности объекта контроля (см. рисунок 2.3). Как и выше, второй размер щели можно условно считать равным бесконечности, $b=\infty$.

Важнейшей характеристикой также является эффективный атомный номер и плотность материала коллиматоры. Отсюда следует, что общее количество параметров, которые необходимо учитывать при проектировании систем ЦР и РВТ, весьма значительно. Среди всей совокупности параметров

необходимо выделить наиболее важные. Проведём краткий анализ задачи контроля крупногабаритных объектов с целью снижения размерности задачи, то есть уменьшения базовых параметров. Анализируемые системы ЦР и РВТ, применяемые для контроля крупногабаритных объектов, должны отвечать требованию определённой степени универсальности по одному или группе негативных физических факторов.



Вид по C

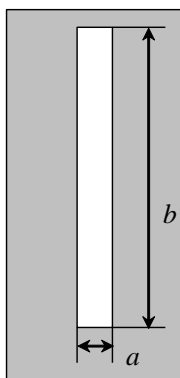


Рисунок 2.3 – Схема ограничения рассеивающего объёма щелевым коллиматором источника излучения :

1 – источник излучения; 2 – щелевой коллиматор; 3 – объект контроля; 4 – детектор

Требование универсальности означает, что проектируемые системы должны быть работоспособны и выполнять свои функции при контроле объектов или их фрагментов, которые являются наиболее непригодными к

испытаниям для того или иного негативного физического фактора. Для рассеяния таким неблагоприятным является объект контроля, который состоит из материала с повышенными рассеивающими свойствами. К отмеченным материалам относятся вещества с небольшим значением эффективного атомного номера [32–33], например, $Z_{эфф}$ от 6 до 14 единиц атомного номера. Отсюда следует допустимость расчётов и экспериментальных исследований для ОК из материала с $Z_{эфф}=6$. Второе допущения связано с формой ОК. Расчёты и эксперименты можно проводить для плоскопараллельного барьера толщиной H . Второе допущение является оправданным, потому что энергетический коэффициент накопления для ограниченного барьера всегда меньше энергетического коэффициента накопления для бесконечного барьера. Третье допущение свяжем с ДРИ и ДТИ, будем считать детекторы детекторами полного поглощения. Четвёртое допущение касается источника излучения, пусть ИРИ или ИТИ является мононаправленным источником с энергетическим спектром, описываемым формулой Крамерса ($E_{max}<1$ МэВ) или формулой Шиффа ($E_{max}>1$ МэВ). Допущение мононаправленности обуславливается тем, что размер апертуры детектора на практике намного меньше фокусного расстояния $F=A+H+R$. Отметим, что для высоких энергий фотонов массовый коэффициент ослабления (МКО) слабо зависит от эффективного атомного атомного номера, поэтому толщину (массовую толщину) ОК разумно измерять в $г/см^2$.

Из вышесказанного следует, что задачу оценки энергетического коэффициента накопления для щелевого коллиматора ИТИ на первом этапе к исследованию зависимости $B_{Э}$ от трёх параметров: максимальной энергии тормозного излучения – E_{max} ; толщины барьера H из материала с $Z_{эфф}=6$; ширина раскрытия щелевого коллиматора детектора – a .

Для проведения вычислительных экспериментов была использована геометрическая схема просвечивания, приведённая на рисунке 1. Для оценки энергетического коэффициента накопления излучения был разработан алгоритм переноса рентгеновского и тормозного излучения методом Монте-

Карло и реализован на языке FORTRAN. Для повышения производительности и точности расчётов использовалась модификация метода Монте-Карло с локальной оценкой интенсивности рассеянного излучения [33]. В качестве формулы для дифференциального по углу сечения некогерентного рассеяния использовалось сечение Клейна-Нишины-Тамма [33], когерентного рассеяния взяты – сечение Релея [33]. Полные сечения взаимодействия γ -излучения с веществом заимствованы из библиотек по взаимодействию гамма-излучения с веществом [34]. В качестве тестовых образцов для проверки расчётов были выбраны плоскопараллельные барьеры из воды толщиной от 1 до 6 д.с.п. и гипотетические моноэнергетические источники излучения с энергией от 1 до 10 МэВ. Для оценки зависимостей B_{Σ} от максимальной энергии излучения – E_{\max} , толщины барьера – H из материала с $Z_{\text{эфф}}=6$, ширины раскрытия щелевого коллиматора детектора – a была проведена серия вычислительных экспериментов.

Результаты проведённых расчетов достаточно хорошо согласуются с данными, приведенными в работе [32], расхождение не более 5 % для числа разыгранных историй превышающих 1 миллион.

В таблице 2.1 приведены результаты вычислительных экспериментов по оценке зависимости $B_{\Sigma}(a)$ для различных E_{\max} из диапазона от 1 МэВ до 10 МэВ, барьер массовой толщиной 80 г/см², эффективный атомный номер – 6. Из анализа полученных результатов, представленных в таблице 2.1, следует, что для раскрытия щели 2 см и максимальных энергий в диапазоне от 2 до 10 МэВ вклад рассеяния в интегральный поток регистрируемого за объектом контроля излучения не превосходит 5 %.

Таблица 2.1 – Зависимость энергетического коэффициента накопления $B_{\text{Э}}$ от раскрытия щели a коллиматора

$a/2$, см	E_{max} , МэВ					
	1	2	4	6	7,5	10
200	6,580	3,896	2,516	2,056	1,885	1,698
100	5,472	3,434	2,394	2,046	1,844	1,662
50	3,993	2,854	2,013	1,766	1,651	1,527
25	2,980	2,105	1,685	1,535	1,472	1,384
15	2,234	1,719	1,449	1,366	1,308	1,264
10	1,790	1,472	1,326	1,257	1,227	1,189
5	1,431	1,269	1,190	1,136	1,122	1,109
2	1,166	1,103	1,074	1,055	1,050	1,044
1	1,0853	1,051	1,033	1,027	1,024	1,022
0,5	1,041	1,024	1,017	1,014	1,012	1,011

Зависимость $B_{\text{Э}}(a)$ возрастает с увеличением a до некоторого предела, и этот предел равен энергетическому коэффициенту накопления излучения в барьерной геометрии $B_{\text{Б}}$. Исследуемая зависимость с достаточной для практики точностью описывается аппроксимационной зависимостью :

$$B_{\text{Э}}(a) - 1 = (B_{\text{Б}} - 1) \cdot (1 - \exp(-c \cdot a)), \quad (2.7)$$

здесь c – параметр аппроксимации, который зависит от E_{max} .

Аппроксимация (2.7) отличается достаточно высокой точностью. Погрешность аппроксимации (2.7) во всём диапазоне E_{max} и диапазоне изменения раскрытия щели коллиматора не превосходит 2 %.

Для обоснования применимости результатов вычислительного эксперимента в практическом выборе параметров коллиматоров систем ЦР и РВТ необходимо проверить адекватность геометрической модели «мононаправленного излучения» реальных геометрическим схемам сканирования. Для этого необходимо определить соотношение параметров геометрической схемы, представленной на рис. 2.3. Напомним, что к указанным параметрам схемы относятся: расстояние от ИТИ до фронтальной поверхности ОК – A ; линейная толщина ОК – H ; расстояние от задней поверхности ОК до ДТИ – R . Для установления адекватности расчётной геометрической модели проведены расчёты зависимости C этой целью были

проведены расчеты зависимости $B_{\Sigma}(A)$ для ИТИ с максимальной энергией $E_{\max}=7,5$ МэВ, при этом учитывалась анизотропия углового распределения тормозного излучения.

Изменение расстояния A в диапазоне от 2 до 20 м приводит к изменению B_{Σ} до 20 % процентов. Указанное изменение энергетического коэффициента накопления излучения обуславливает изменение радиационного контраста не более чем на 3 %. Для малых значений расстояния A применение щелевой коллимации менее эффективно по сравнению с геометрической моделью плоского мононаправленного ИТИ. Значение B_{Σ} для точечного анизотропного ИТИ с $E_{\max}=7,5$ МэВ, для $A=3$ м примерно равно 1,05 для раскрытия щели $a=2$ см.

Очевидно, что на значение энергетического коэффициента накопления влияет расстояние от ОК до ДТИ – R . Для ИТИ с $E_{\max}=7,5$ МэВ. При вариации расстояния R в диапазоне от 10 см до 1 м значение B_{Σ} различается не более чем на 8 %.

Проведенные исследования показали, что для оценки эффективности применения щелевой коллимации источника тормозного излучения достаточно рассмотреть задачу для геометрии плоского мононаправленного источника излучения.

Во введении отмечено, что в последнее десятилетие произошли революционные изменения в производстве ДРИ и ДТИ. Здесь намеренно подчеркивается существенное различие между детекторами рентгеновского излучения и детекторами высокоэнергетического тормозного излучения. Главными характеристиками многоканальных детекторов является, применяемых в системах ЦР и РВТ, является контрастная чувствительность и пространственное разрешение. Пространственное разрешение определяется, прежде всего, поперечными размерами радиационно-чувствительного объема, соответствующего одной точке цифрового радиографического изображения в ЦР или проекции в РВТ. Такой объем РЧО логично называть элементарным объемом – от слова «элемент».

Уменьшение поперечных размеров элементарного РЧО приводит к повышению пространственного разрешения, но одновременно наблюдается уменьшение числа фотонов, пересекающих фронтальную поверхность элементарного РЧО. Следует также отметить, что достижимое для ИРИ в принципе требование полного поглощения фотонов для ИТИ не является реализуемым. На настоящий момент времени коммерческие ДТИ имеют поперечный размер РЧО в пределах 1–2 мм. На рынке научного оборудования имеются также ДТИ с размерами РЧО от 100 мкм до 200 мкм, но слабая радиационная, а зачастую и световая, изолированность РЧО в таких детекторах не позволяет достичь нужной конечному потребителю систем ЦР и РВТ уровень пространственного разрешения. Известно, что приближение ОК к источнику излучения при сохранении фокусного расстояния позволяет повысить пространственное разрешение. Это замечание справедливо для ИРИ и ИТИ с малым размером излучающей поверхности. Источники рентгеновского излучения и тормозного излучения с малым размером фокусного пятна отличаются высокой стоимостью и меньшей долговечностью.

Из сказанного выше следует, что величина B_{Σ} не определяет выбор расстояния A . Более значимыми факторами здесь являются увеличение пространственного разрешения с уменьшением указанного расстояния и возможное уменьшение производительности систем ЦР и РВТ, обусловленное ярковыраженной анизотропией излучения.

Приведённые в данном подразделе результаты позволяют разработать рекомендации к рациональному выбору параметров щелевых коллиматоров в системах ЦР и РВТ. Рекомендации к выбору параметров коллиматоров будут приведены ниже, после рассмотрения ограничительных требований к уровню энергетического коэффициента накопления B_{Σ} .

2.3 Экспериментальная оценка энергетического коэффициента накопления тормозного излучения

Возможность экспериментальной оценки приборного коэффициента накопления основана на достаточно очевидном факте, связанном с положением имитатора дефекта относительно источника излучения, ОК и детектора излучения.

Если имитатор дефекта находится со стороны источника излучения, то радиационный контраст k_X для такого варианта находится по формуле

$$k_X = \frac{\mu_{\text{дифф}}(E_{\text{max}}, H)\Delta H}{B_{\text{э}}}, \quad (2.7)$$

здесь $\mu_{\text{дифф}}$ – дифференциальный ЛКО рентгеновского или тормозного излучения для материала ОК; ΔH – толщина дефектометра.

Если имитатор дефекта находится со стороны детектора излучения, а в идеале прилегает к фронтальной поверхности детектора, то радиационный контраст близок к контрасту для нерассеянного излучения k_{X0}

$$k_{X0} = \mu_{\text{дифф}}(E_{\text{max}}, H)\Delta H. \quad (2.8)$$

Из выражений (2.7), (2.8) вытекает формула для экспериментальной оценки энергетического коэффициента накопления.

$$B_{\text{э}} \approx \frac{k_{X0}}{k_X}. \quad (2.9)$$

Отметим, что такой подход к оценке энергетического коэффициента накопления излучения работоспособен для систем с коллиматорами источников и (или) детекторов излучения и без коллиматоров.

Эксперимент проводился на инспекционно-досмотровом комплексе (ИДК) Томского политехнического университета с источником излучения – бетатроном с максимальной энергией 9 МэВ, который представляет собой систему высокоэнергетической цифровой радиографии. На рисунке 2.3 приведено изображение ИДК ТПУ.



Рисунок 2.3 – Инспекционно-досмотровый комплекс с бетатроном МИБ-9:
 1 – бокс с бетатроном; 2 – щелевой коллиматор; 3 – детекторный портал;
 4 – горизонтальная линейка детекторов; 5 – вертикальная линейка детекторов;
 6 – тестовый объект; 7 – операторская

Основные технические характеристики ИДК ТПУ:

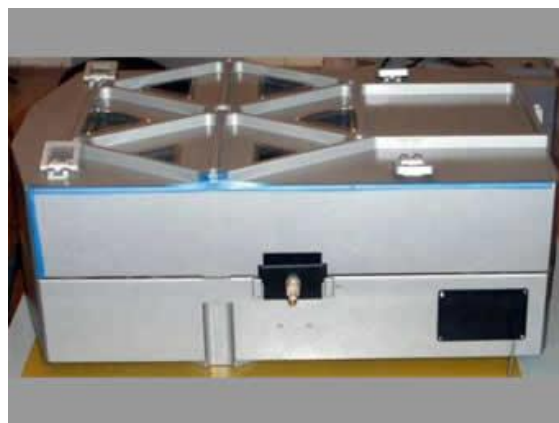
- диапазон максимальных энергий тормозного излучения 4 – 9 МэВ;
- количество детекторов 864;
- расстояние от источника излучения до линейки детекторов 4,2 м;
- высота сканируемого объекта до 2,5 метров;
- размер сцинтилляционного монокристалла детектора $4 \times 6 \times 35 \text{ мм}^3$;
- пространственное разрешение 3 мм в центре сканируемого объекта.

В процессе экспериментов в качестве источников высокоэнергетического тормозного излучения использовались бетатроны МИБ-9/4 и МИБ 7,5/4, которые изготовлены в Томском политехническом университете.

На рисунке 2.4 изображены бетатроны на 7,5 и 10 МэВ, которые применяются в инспекционных досмотровых комплексах.



a



b

Рисунок 2.4 – Малогабаритные бетатроны: *a* – МИБ-7,5; *b* – КРАБ (10 МэВ)

В таблице 2.2 приведены основные технические данные линейки бетатронов, производимых в ТПУ.

Тормозное излучение регистрировалось двумя системами детектирования – штатной системой детектирования ИДК ТПУ на основе сцинтилляторов CdWO_4 и мобильной портативной системой детектирования на базе сцинтилляторов CsI . Мобильная портативная система детектирования произведена фирмой PowerScan (КНР). Эта система представляет собой объединение двух параллельных линейных детекторов со встроенным программным обеспечением для калибровки по «чёрному» и уменьшения вклада послесвечения сцинтилляторов.

Таблица 2.1 – Технические характеристики малогабаритных бетатронов

№ пп	Характеристика	Модель					
		МИБ-4	МИБ-5	МИБ-6	МИБ-7,5	КРАБ	«Шелест-Б»
1	Максимальная энергия, МэВ	4	4	6	7,5	10	4,5
2	Мощность дозы тормозного излучения на 1 м от мишени, сГр/мин	1	3	3,0	5	20	2
3	Размер фокусного пятна, мм ²	0,3×2	0,3×2 ³	0,3×3	0,3×3	0,5×3	0,3×3
4	Частота следования циклов ускорения, Гц	200	300	200	200	150	200
5	Потребляемая мощность, кВт	1,5	2,5	2,0	2,5	3,6	1,6
6	Максим. просвечиваемая толщина, мм:						
	сталь	150	150	250	300	350	200
	бетон	600	800	100	1200	1500	—
7	Относительная рентгенографическая чувствительность, %	1	1	0,6	0,6	1	1

Массовая толщина фрагментов тестового объекта варьировались от 20 до 80 г/см². Результаты экспериментальной оценки энергетического коэффициента накопления по формуле (2.9) и расчета по формуле (2.6) хорошо согласуются, расхождение не более 10 % для всего исследуемого диапазона изменения массовых толщин ОК.

Таким образом, полученные расчётные зависимости приборного коэффициента накопления для мононаправленного (2.4) и изотропного (2.6) источников излучения позволяют довольно просто число оценить ожидаемый вклад рассеянного излучения в суммарный вклад на выходе щелевого коллиматора или выбрать параметры коллиматора, исходя из предельно допустимого соотношения вкладов рассеянного и нерассеянного излучений в суммарный сигнал. Напомним, что рекомендации по выбору параметров щелевых коллиматоров будут приведены ниже.

В классической цифровой радиографии наличие фактор рассеяния может привести к уменьшению контраста изображений мелких деталей и к

уменьшению вероятности их (деталей) обнаружения. Исследуемый фактор более сложным образом преломляется в рентгеновской вычислительной томографии. В работе [36] рассмотрен подход к оценке погрешности, обусловленной рассеянием в РВТ. Воспользуемся этим подходом для решения обратной задачи – получения ограничений на вклад рассеяния в интегральные сигналы, исходя из значений потребительских параметров применительно к оценке распределения ЛКО в РВТ.

2.4 Оценка погрешности оценки ЛКО в РВТ

Известно, что одной из причин появления артефактов в РВТ является рассеяние. В научной литературе приведены [16-17] конкретные результаты экспериментальных исследований, иллюстрирующих влияние рассеяния на точность распределения ЛКО по сечению в РВТ. В статьях [37] приведён подход, базирующийся на восстановлении сечений тел вращения с помощью обратного преобразования Абеля. Такой подход позволяет исследовать влияние различных физических факторов в отдельности и в совокупности на качество контроля.

Воспользуемся подходом из работы [39] показано для оценки влияния на примере однородного тела вращения рассеянного излучения на точность восстановления сечения в РВТ. Проекция в приближении узкого пучка моноэнергетического излучения описывается выражением

$$p(r) = 2 \int_r^R \frac{\mu(x)x}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx, \quad (2.10)$$

где R – радиус ОК; $\mu(x)$ – радиальное распределение ЛКО.

Решение уравнения (2.10) относительно ЛКО аналогично решению уравнения Абеля [40]

$$\mu(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{p'(x)}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx. \quad (2.11)$$

Формула (2.11) является основой для последующего анализа. Её универсальность позволяет исследовать влияние любого физического фактора на точность восстановления радиального распределения ЛКО – $\mu(x)$. Для этого необходимо получить аналитическое или экспериментальное описание проекции $p(r)$ с учётом анализируемого фактора. Единственным требованием является достаточная гладкость функции $p(r)$.

Для источников импульсного тормозного и рентгеновского излучения экспериментально разделить артефакты немоноэнергетичности и рассеяния практически невозможно. Альтернативы численному моделированию в данном случае не существует.

Рассмотрим однородный ОК значительного диаметра. Пусть объект облучается тормозным излучением с максимальной энергией E_{\max} и энергетическим спектром $f(E, E_{\max})$. РЧО детектора излучения из материала с эффективным атомным номером Z_d и толщиной h_d . С достаточной для практических приложений точностью проекция $p_{rs}(r)$ может быть описана выражением

$$p_{rs}(r) = -\ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) B(E, Z, H) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H(r)} \varepsilon(E, Z_d, h_d) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, Z_d, h_d) dE}, \quad (2.12)$$

здесь $E_{ab}(E)$ – энергетическая зависимость поглощённой энергии зарегистрированного фотона; ε – эффективность регистрации детектора; B – энергетический коэффициент накопления излучения.

Проекция $p_{rs}(r)$ позволяет учесть одновременно два негативных фактора и определить смесь артефактов – немоноэнергетичности и рассеяния.

Функциональное описание проекция $p_r(r)$ без учёта рассеяния необходимо для расчётного вычленения артефакта рассеяния

$$p_r(r) = -\ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{\text{ab}}(E) f(E, E_{\max}) e^{-m(E,Z)\rho H(r)} \varepsilon(E, Z_d, h_d) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{\text{ab}}(E) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, Z_d, h_d) dE}. \quad (2.13)$$

Функциональное описание проекции $p_r(r)$ (2.13) в совокупности с выражением (2.11) позволяет получить оценку радиального распределения ЛКО $\mu_r(r)$ с учётом немонотонности, а $p_{rs}(r)$ (2.12) и обращение преобразования Абеля (2.11) – оценку радиального распределения ЛКО $\mu_{rs}(r)$ с учётом немонотонности и рассеяния.

Модель, учитывающая влияние негативных факторов на качество контроля применительно к рассматриваемой задаче, должна учитывать уменьшение энергетического коэффициента накопления излучения B , обусловленное щелевой коллимацией с раскрытием щели a . Для этого воспользуемся аппроксимацией (2.7), которую с учётом линейной аппроксимации коэффициента накопления можно трансформировать следующим образом

$$B(a, E, Z, H) = 1 + k(E, Z)m(E, Z)\rho H \cdot (1 - \exp(-c \cdot a)), \quad (2.4)$$

здесь $k(E, Z)$ – коэффициент упомянутой линейной аппроксимации.

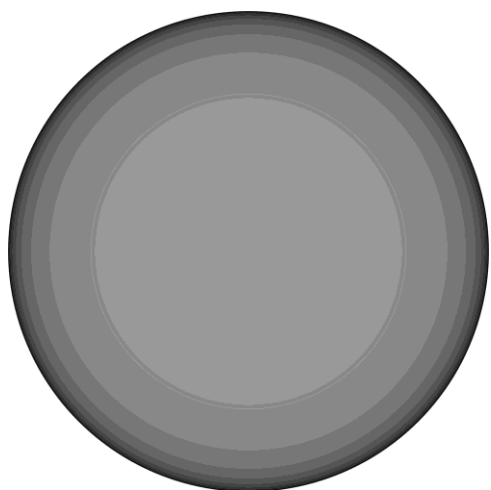
Пример оценки влияния рассеяния на точность определения ЛКО

Для иллюстрации подхода к оценке влияния рассеяния на точность определения ЛКО были выбраны однородные цилиндрические объекты диаметром от 20 до 60 г/см² из углерода, алюминия и стали. Максимальная энергия ИТИ $E_{\max}=7,5$ МэВ, РЧО элементарного детектора изготовлен из CdWO_4 толщиной $h_d=35$ мм. Раскрытие щели коллиматора варьировали от 0 (геометрия узкого пучка излучения) до ∞ (геометрия широкого пучка излучения). Толщина коллиматора обеспечивает «полную» её непрозрачность для тормозного излучения

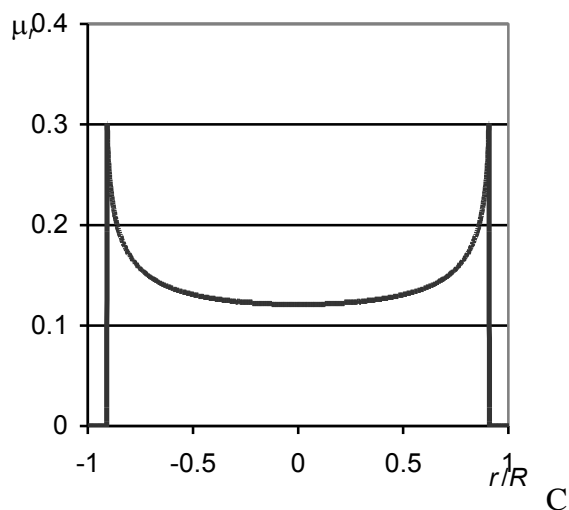
На рисунке 2.5 для объектов из углерода, алюминия и стали приведены полутоновые изображения распределения оценки ЛКО по

сечению ОК без учёта рассеяния, а на рисунке 2.6 с учётом рассеяния без коллимации. На рисунках приведены зависимости $\mu_r(r)$ и $\mu_{rs}(r)$.

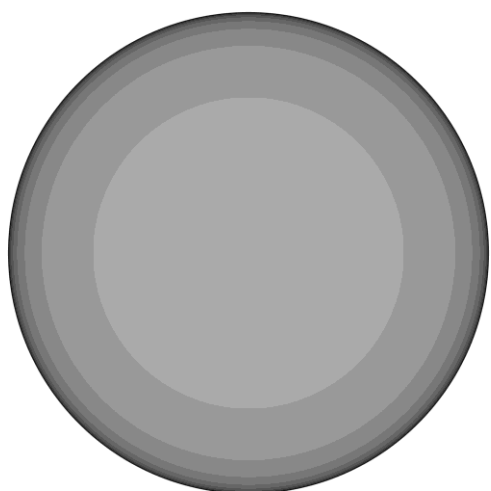
Из анализа данных, представленных на рисунке 2.5, можно отметить, что оценка ЛКО на границе объекта существенно больше оценки ЛКО в центре ОК. Оценки ЛКО возрастают с увеличением эффективного атомного номера материала ОК.



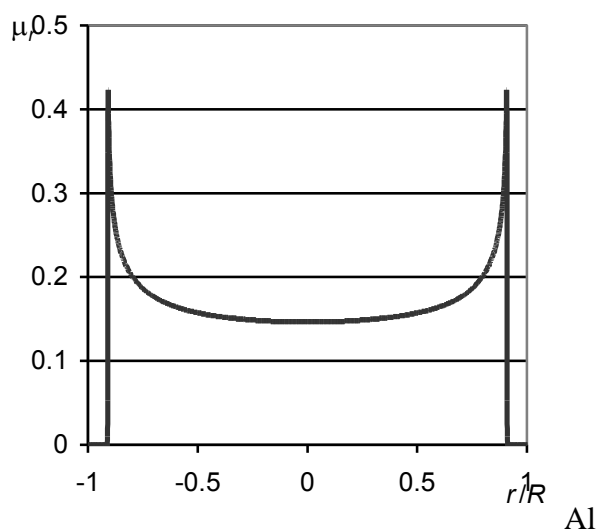
C



C



Al



Al

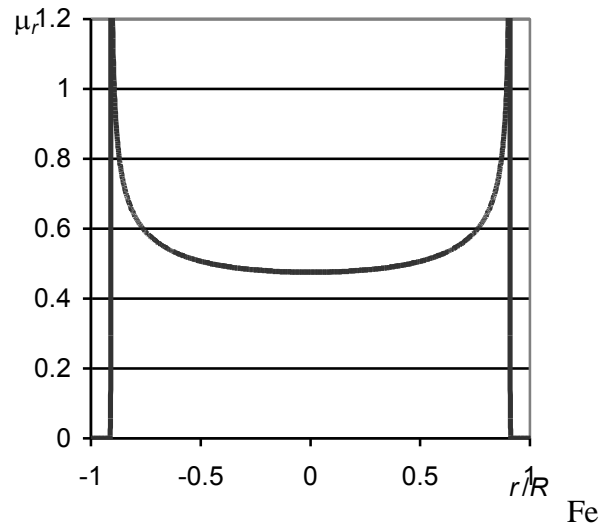
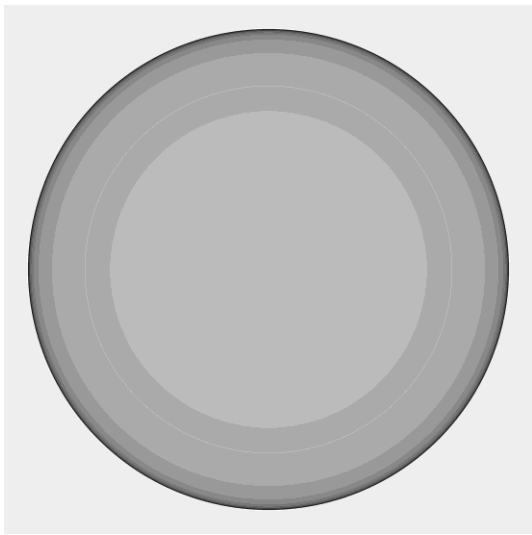
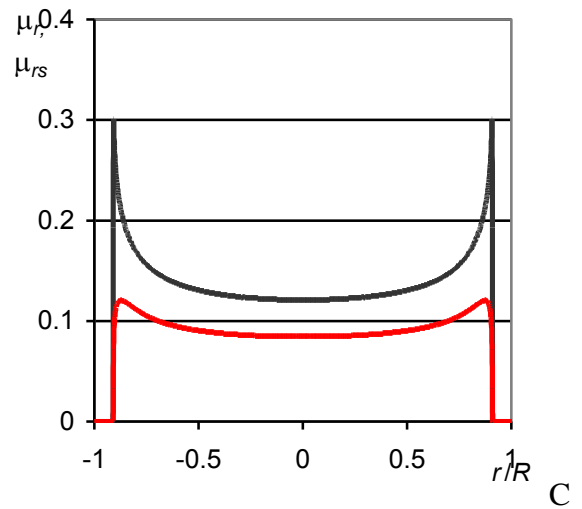
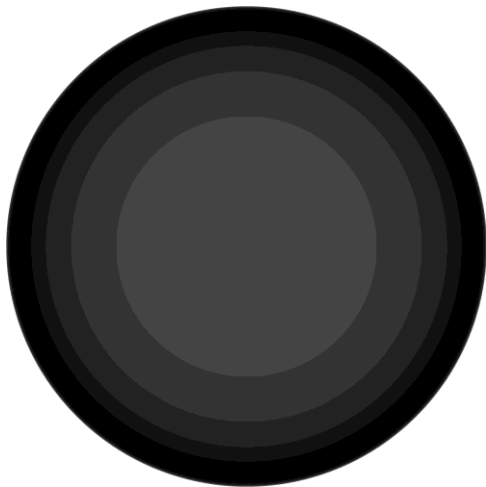


Рисунок 2.5 – Полутоновые изображения сечения ОК и $\mu_r(r)$ без учёта рассеяния

Для удобства сравнения на рисунке 2.6 графики $\mu_r(r)$ (—) и $\mu_{rs}(r)$ (—) приведены вместе. Из анализа изображений и графиков, приведённых на рисунке 2.6, можно сделать вывод о занижении рассеянием оценки ЛКО.



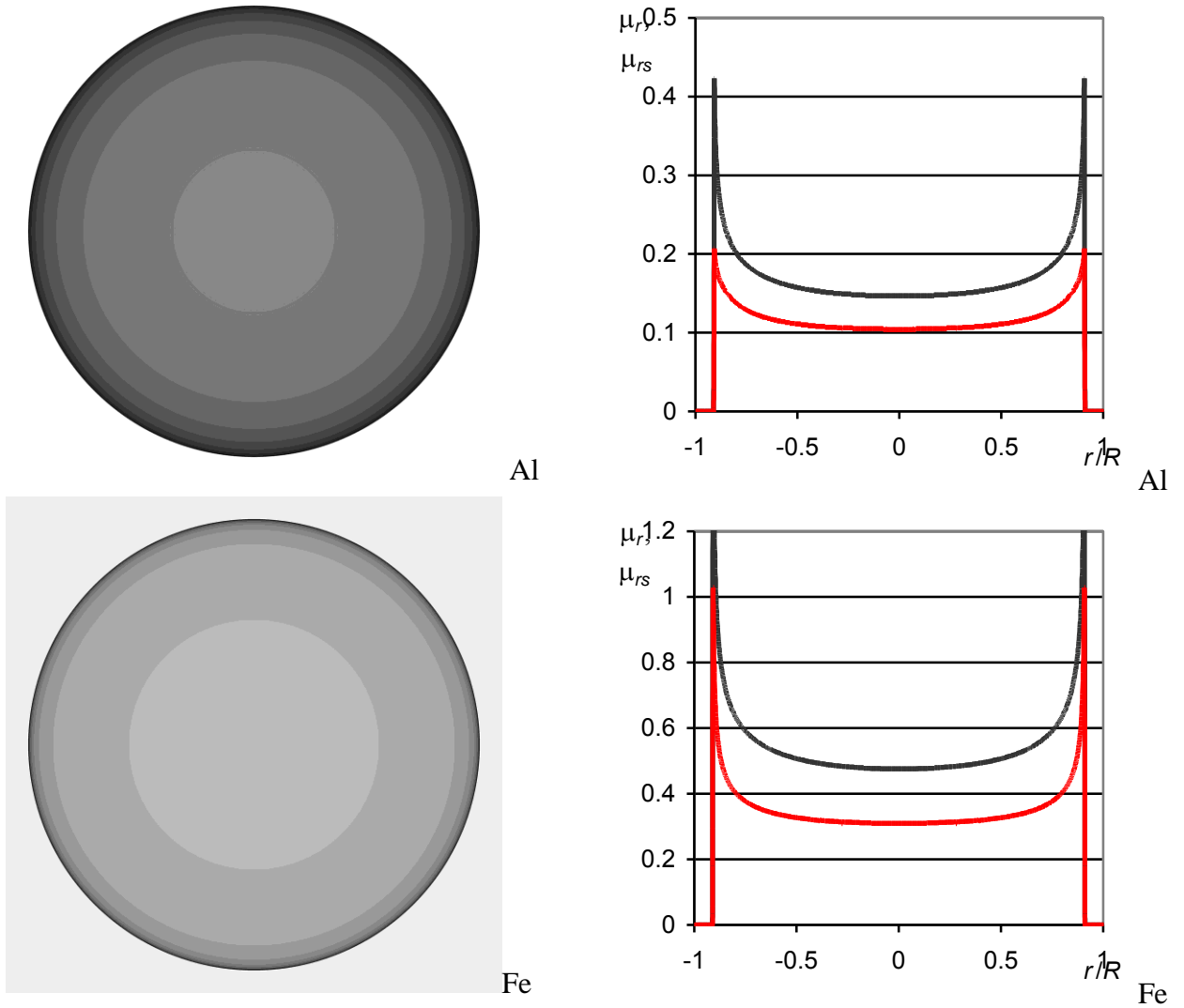


Рисунок 2.6 – Полутоновые изображения сечения ОК и $\mu_{rs}(r)$ с учётом рассеяния

На рисунках 2.7 для испытуемых объектов приведены изображения ЛКО и зависимости $\mu_{rs}(r)$ для раскрытия щели коллиматора $a=2$ мм. При моделировании использовалась аппроксимация (2.4). Для иллюстрации степени влияния рассеяния на качество контроля графики $\mu_{rs}(r)$ приводятся в паре с $\mu_r(r)$.

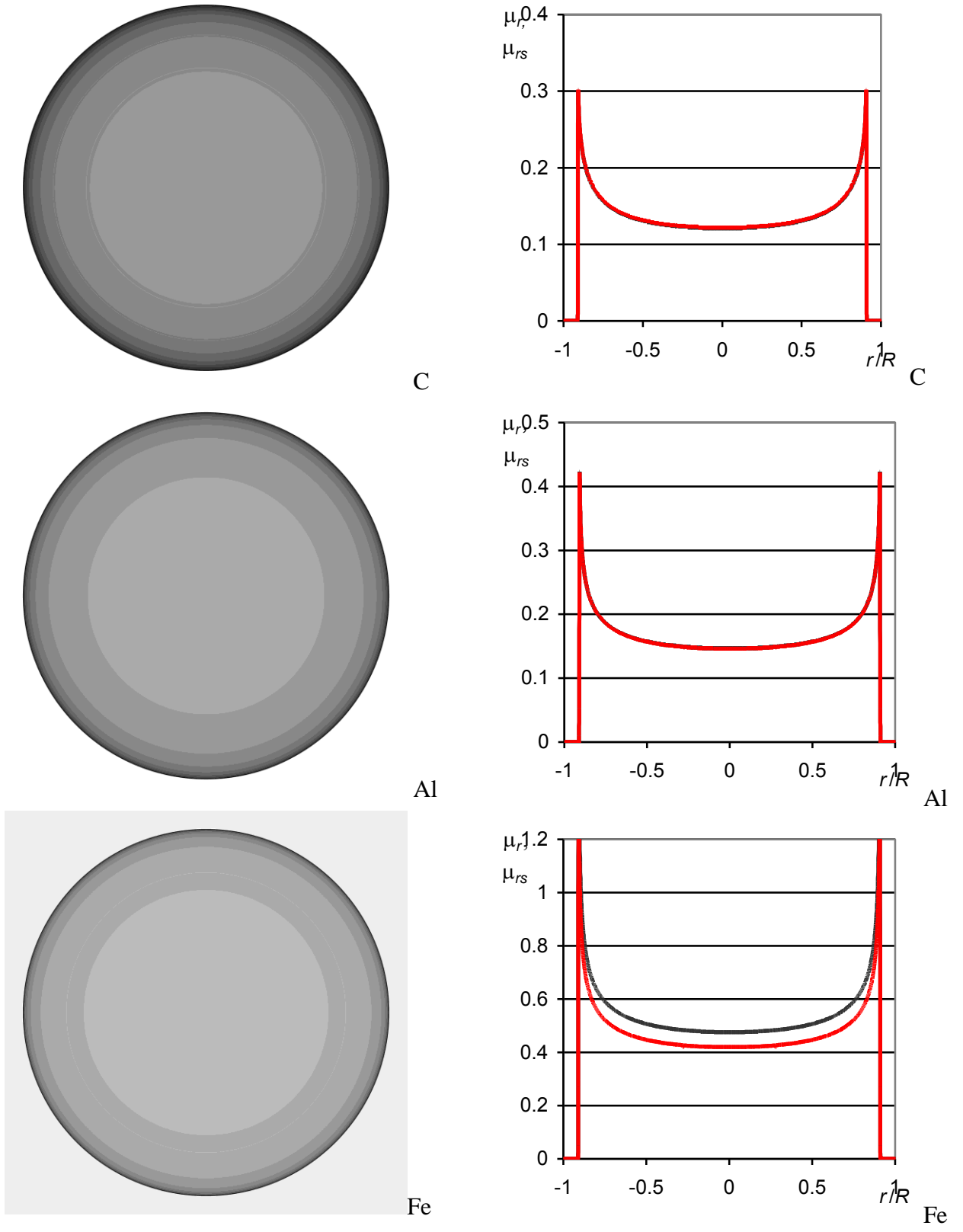


Рисунок 2.7 – Полутоновые изображения сечения ОК и $\mu_{rs}(r)$ с учётом коллимации: ширина щели $a=2$ мм

Данные, приведённые на рисунке 2.7, свидетельствуют о значимой эффективности щелевой коллимации для ширины щели $a=2$ мм.

Следует отметить, что даже существенное ограничение пучка излучения щелью шириной 2 мм не позволяет свести влияние рассеяния на качество контроля к потребительским уровням.

Приведённые в рассматриваемом разделе результаты теоретических и экспериментальных исследований подтверждают необходимость ограничения пучка рентгеновского излучения с целью уменьшения влияния рассеяния на качество контроля в системах цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии. Эти результаты могут быть использованы при выборе параметров коллиматоров в анализируемых системах, исходя из заданных потребителей требований к качеству систем.

3 Алгоритм и программа для оценки эффективности применения коллиматоров

Выше отмечено, что в настоящее время происходят радикальные изменения в методах и средствах ЦР и РВТ, приводящие к расширению сферы их приложений [21, 39]. Наиболее значимые приложения ЦР и РВТ последних десятилетий связаны с неразрушающим контролем, испытаниями и диагностикой крупногабаритных изделий сложной структуры, а также с досмотровым контролем транспортных средств и крупногабаритных грузов. Реализация соответствующих систем ЦР и РВТ для указанных приложений не представляется возможной без высокоэнергетических ИТИ. Такими источниками излучения являются малогабаритные бетатроны и линейные ускорители электронов (ЛУЭ) [41–42]. В предыдущих разделах отмечено значимое влияние излучения, рассеянного в материале объекта контроля, на качество конечных изображений и оценок параметров ОК в системах ЦР и РВТ. Наиболее реализуемым подходом к уменьшению вклада рассеяния в аналоговые сигналы на выходе многоканальных ИТИ является подход, связанный с применением различных коллиматоров. В анализируемых системах применяют пинхольные и щелевые коллиматоры. Здесь под пинхольными коллиматорами понимаются коллиматоры диафрагменного типа с малым диаметром диафрагм и, соответственно, с большой степенью коллимации. Сложности производства, настройки и наличие «мёртвых» зон ограничивают применение пинхольных коллиматоров. Именно поэтому наибольшее применение в системах ЦР и РВТ получили щелевые коллиматоры. Одновременное использование щелевой коллимации ИТИ и линейных ДТИ позволяет существенно ограничить пучок исходного излучения и свести к приемлемому уровню вклад рассеяния в исходные информационные сигналы. Указанный уровень определяется на исследовательской стадии проектирования систем ЦР и РВТ, предназначенной для оценки технической реализуемости заявляемого

проекта. Здесь под технической реализуемостью понимается достижение целей необходимых измерений в заданное потребителем время и с заданной им же точностью. Экспериментальный подход к проектированию систем ЦР и РВТ в целом и отдельных их составляющих в частности в настоящий период времени не оправдан с точки зрения колоссальных временных и материальных затрат. Не является исключением и проектирование коллиматоров. С середины шестидесятых годов прошлого века в различных отраслях науки, связанных с взаимодействием ионизирующих излучений с веществом, развивается метод Монте-Карло (ММК). Этот метод базируется на совокупности закономерностей взаимодействия различных типов взаимодействия с веществом. Метод Монте-Карло получил наибольшее развитие для исследования трансформации полей гамма, рентгеновского и тормозного излучения. Наличие развитых баз данных, многочисленных литературных источников позволяют судить о достоверности результатов, полученных методом Монте-Карло. В этой ситуации объём экспериментальных исследований сводится к минимуму. Достоинством ММК является рассмотрение траектории каждого отдельного фотона с учётом его взаимодействий с веществом, приводящим к изменению направления движения фотона и уменьшению его энергии. В натурном эксперименте сходимость процесса определяется количеством фотонов, а в вычислительном эксперименте – количеством розыгрышей. Метод Монте-Карло позволяет учесть все нюансы испускания, взаимодействия с веществом и регистрации фотонов для сколь угодно сложных геометрий ОК, конструкций коллиматоров и т.п. До недавнего времени существенным ограничением ММК являлась вычислительная сложность соответствующих алгоритмов. Появление высокопроизводительных компьютеров и вычислительных систем несколько ослабило значимость отмеченного ограничения. Совершенствование методов ММК происходит также по направлению применения различного рода оценочных промежуточных усреднений и приближений, адекватных реальным физическим подходам.

Следует отметить, что на рынке научных программ моделирования переноса фотонного излучения методом Монте-Карло имеются несколько наиболее популярных образцов [40], например, GIANT. Практическое применение подобных программ ограничивается рядом факторов, среди которых следует отметить: высокую стоимость лицензии; сложность адаптации к конкретной геометрии переноса излучения; универсальность. Продолжают оставаться актуальными задачи разработки алгоритмов и реализующих их программ для оценки параметров переноса излучения для конкретной задачи. В рассматриваемом случае необходимо разработать алгоритм и программу для оценки эффективности применения щелевой коллимации.

С максимальной степенью подробности приведём алгоритм моделирования для оценки коэффициента энергетического накопления излучения для щелевой коллимации источника тормозного излучения.

Предлагаемый алгоритм базируется на классических работах [43], посвящённых моделированию переноса гамма-излучения, с учётом ряда модификаций, способствующих повышению производительности вычислительного процесса и точности конечных оценок.

3.1 Исходные данные для моделирования переноса излучения

Без потери общности можно рассмотреть алгоритм для плоского моно-направленного источника излучения. Пусть фокусное пятно тормозного излучения имеет радиус r_0 , максимальная энергия – E_{\max} , непрерывный энергетический спектр ИТИ описывается формулой $f(E, E_{\max})$; детектор точечный и полного поглощения. Пучок тормозного излучения ограничивается щелью с размера $d \times p$, $d \ll p$ толщиной l . В качестве функции $f(E, E_{\max})$ использована формула Шиффа с модификациями из работы [44]. Диапазон изменения максимальных энергий ИТИ E_{\max} определяется диапазоном регулирования малогабаритных бетатронов производства ТПУ – от 4 МэВ до 9 МэВ. Основными эффектами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются фотоэффект, эффект Комптона, эффект Релея и

эффект образования пар. Алгоритм моделирования предназначен для оценки зависимости $B_{\text{Э}}(a)$ для объектов различной толщины H из материалов плотностью ρ и атомным номером Z . Варьируемыми параметрами могут быть: расстояние от ИТИ до ОК – A ; расстояние от ОК до ДТИ – R . Количество разыгрываемых траекторий фотонов N задаётся в блоке исходных данных алгоритма и корректируется в процессе вычислительных экспериментов с целью обеспечения необходимой точности оценки $B_{\text{Э}}(d)$.

Отметим, что алгоритм может быть использован для точечного источника тормозного излучения – в этом случае $r_0=0$.

3.2 Формирование пользовательской базы данных по взаимодействию гамма-излучения с веществом

В работе [46] подчёркнуто, что обеспечение быстродействия алгоритма моделирования обуславливает необходимость формирования пользовательской базы данных по взаимодействию гамма-излучения с веществом. Пользовательская база формируется на основе любой библиотеки данных о взаимодействии гамма-излучения с веществом, например, [22]. Библиотеки могут содержать данные по сечениям взаимодействия или по МКО гамма-излучения. Таблицы с МКО являются более удобными в использовании, поэтому остановимся на них. К библиотекам данных можно выдвинуть одно требование. Библиотека должна содержать таблицу энергетических зависимостей (по сетке $E_i, i=1..n$) МКО гамма-излучения с веществом $m_{\text{tot}}(E_i)$ и парциальных МКО для фотоэффекта $m_{\text{foto}}(E_i)$, эффекта Комптона $m_{\text{C}}(E_i)$, эффекта Релея $m_{\text{K}}(E_i)$ и эффекта рождения пар $m_{\text{par}}(E_i)$ здесь i изменяется от 1 до n .

Первый этап сводится к формированию совокупности таблиц ЛКО – $\mu_{\text{tot}}(E_i)$, $\mu_{\text{foto}}(E_i)$, $\mu_{\text{C}}(E_i)$, $\mu_{\text{K}}(E_i)$ и $\mu_{\text{par}}(E_i)$ для материалов ОК из зоны потребительского интереса. Пользовательская база данных должна обеспечить высокоскоростное и точное оценивание всех ЛКО для любой энергии фотонов E , в том числе и отличающихся от узлов энергетической

сетки. В статье [47] предложено использовать сплайн-интерполяцию, поэтому пользовательская база данных включает в себя полную совокупность коэффициентов сплайн-интерполяции: a_i, b_i, c_i, d_i для энергетической зависимости $\mu_{tot}(E_i)$; $a_{foto\ i}, b_{foto\ i}, c_{foto\ i}, d_{foto\ i}$ – для $\mu_{foto}(E_i)$; $a_{C\ i}, b_{C\ i}, c_{C\ i}, d_{C\ i}$ – для $\mu_C(E_i)$; $a_{K\ i}, b_{K\ i}, c_{K\ i}, d_{K\ i}$ – для $\mu_K(E_i)$; $a_{par\ i}, b_{par\ i}, c_{par\ i}, d_{par\ i}$ – для $\mu_{par}(E_i)$. Для удобства и общности подходов в формируемую базу включаются аппроксимирующие функции, которые являются обратными к $F(E)$ – функции распределения случайной величины – энергии E . Функция $F(E)$ находится из числового энергетического спектра $f(E, E_{max})$ [47] для ИТИ с максимальной энергией E_{max}

$$F(E) = \int_0^{E_{max}} f(E, E_{max}) dE. \quad (3.1)$$

В [22] рекомендуется из таблицы функции $F(E)$ сформировать таблицу обратной функции $F^{-1}(E)$. На основе таблицы обратной функции строится соответствующая сплайн-интерполяция, коэффициенты которой – $a_{fj}, b_{fj}, c_{fj}, d_{fj}$ включается в пользовательскую базу данных.

3.3 Обобщённый алгоритм моделирования переноса тормозного излучения в объекте контроля

Моделирование переноса тормозного излучения в объекте контроля методом Монте-Карло сводится к повторяющейся процедуре блуждания единичного фотона по внутреннему объёму ОК. Блуждание фотона состоит из дискретного набора состояний. Каждое состояние описывается набором, состоящим из вектора с энергетическими и пространственными компонентами. К таким компонентам относятся:

- энергия фотона – E ;
- пространственные координаты точки взаимодействия в неподвижной системе координат – (x, y, z) ;
- направление движения фотона до взаимодействия, полярный и азимутальный углы – ψ и ω ;

– углы рассеяния – θ и γ .

На рисунке 4.1 приведена традиционная геометрическая схема розыгрыша процесса переноса гамма-излучения в объекте контроля радиусом $r \gg 0$ с указанием неподвижной системы координат XOY с точечным источником излучения, лежащим на поверхности ОК.

Для определения направления движения фотона вводятся полярный и азимутальный углы, отмеченные выше. На рисунке 3.1 красной непрерывной линией отмечена траектория первичного кванта, а красной прерывистой линией отмечена траектория фотона, испытавшего взаимодействие, (вторичного фотона). В процессе взаимодействия гамма-квантов формируются и вторичные электроны с направлениями движения, отмеченными на рисунке 3.1 зелёным цветом.

Напомним, что взаимодействие гамма- или рентгеновского излучения происходит по одному из сценариев, соотносящихся с эффектами взаимодействия: фотоэффектом; эффектом Релея; эффектом Комптона; эффектом рождения пар.

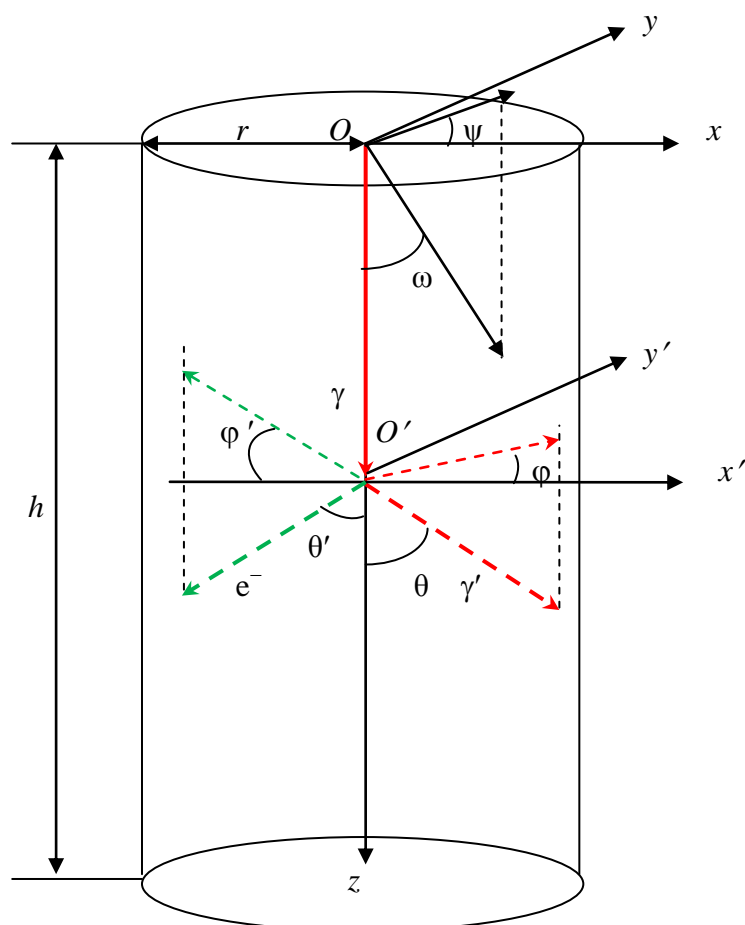


Рисунок 3.1 – Геометрическая схема взаимодействия фотонов с материалом ОК

Изменение состояний фотона в процессе последовательных его взаимодействий с материалом ОК происходит по одному из сценариев.

Первый сценарий соотнесём с фотоэффектом. В этом случае первичный фотон поглощается полностью и его история, как фотона, заканчивается. В результате начинается розыгрыш второго фотона. История же энергии поглощённого фотона на этом не заканчивается. Вторичный электрон, траектория отмечена на рисунке 4.1 зелёным цветом, может оставить в материале ОК не всю энергию, часть её может добраться до детектора. Вероятность отмеченного события для крупногабаритных ОК очень мала. Отсюда следует, что перенос вторичных электронов в задачах переноса излучения в крупногабаритных объектах, как правило, не рассматривают. Указанный вывод справедлив и для всех прочих эффектов

взаимодействия фотонов с веществом.

Второй сценарий изменения состояния фотона связан с эффектом Релея, то есть когерентным рассеянием. В случае когерентного рассеяния энергия вторичного фотона совпадает с энергией первичного фотона, вторичный электрон не образуется, изменяется направление движения вторичного фотона.

Третий сценарий определяется эффектом Комптона, то есть некогерентным рассеянием. В случае некогерентного рассеяния превращение первичного фотона во вторичный фотон сопровождается передачей энергии вторичному электрону и изменением направления движения по строго определённым вероятностным законам.

В четвёртом сценарии, ассоциируемым с эффектом образования пар, часть энергии передаётся материалу ОК с возбуждением вторичного электрона, а оставшаяся часть, равная 1,022 МэВ, приводит к образованию электрон-позитронной пары, в результате аннигиляции которой образуются два вторичных фотона с энергией, равной 0,511 МэВ.

Выше уже отмечено, что для удобства вычислений введены несколько систем координат, облегчающих перерасчёт координат исходного состояния фотона в координаты последующего состояния. Вспомогательная полярная система координат связана с угловыми координатами изменения состояния частиц. Полярные углы θ и θ' определяются направлениями движения первичного фотона и вторичного фотона и (или) или электрона. Азимутальные углы φ и φ' равны углу между проекцией вектора движения вторичной частицы на плоскость $X'O'Y'$ и осью $O'X'$, смотри рисунок 4.1.

Известно, что значение энергетического коэффициента накопления излучения для барьерной геометрии всегда больше, чем для ограниченного барьера. Поэтому будем оценивать $B_{\Sigma}(a)$ для цилиндрического барьера большого радиуса r . Граница указанного барьера S в неподвижной системе координат описывается выражением

$$\mathbf{S} = \left\{ (x, y, z) : \begin{cases} x^2 + y^2 = r^2, & 0 < z < h, \\ x^2 + y^2 \leq r^2, & z = 0 \vee z = h \end{cases} \right\}. \quad (3.2)$$

Существуют модификации метода Монте-Карло, абсолютно натуралистично повторяющие поведение реальных фотонов при их взаимодействии с материалом. В практических вычислительных экспериментах подобный подход отличается исключительно низкой производительностью. Более применимы те модификации ММК, которые при каждом изменении состояния фотона учитывают некоторый средний ожидаемый вклад в информационный сигнал. Такие модификации отличаются быстрой сходимостью, высокой производительностью и высокой точностью получаемых оценок.

Ниже приведём в кратком виде этапы алгоритма оценки интересующей нас зависимости $B_{\Sigma}(d)$. Напомним, что алгоритм предназначен для исследования процесса переноса тормозного излучения в крупногабаритных объектах, поэтому транспорт вторичных электронов мы будем учитывать в алгоритме, но на практике эту ветвь алгоритма можно отсекать по значению ключа, например, $k_e=1$.

Надёжность и безотказность алгоритма, а также его прозрачность обеспечивается прописыванием всех этапов процесса моделирования с указанием и нумерацией всех необходимых формул и объяснением возможных переходов.

Нулевой этап. Обнуление счетчика разыгрываемых историй i , сумматора энергий рассеянного излучения ΣE_S и квадратов энергий рассеянного излучения ΣE_S^2

$$i=0, \quad (3.3)$$

$$\sum E_S = 0, \quad (3.4)$$

$$\sum E_S^2 = 0. \quad (3.5)$$

Заметим, что введение счётчика ΣE_S^2 не является обязательным, но на практике представляет вопрос вклада рассеяния в структуру шумов в

радиографических изображениях и проекциях в РВТ.

Первый этап. Вычисляются координаты x, y, z вхождения фотона в объект контроля и полярные координаты ω, ξ вектора направления движения фотона и координаты a, b, c единичного вектора направления движения фотона и весовой фактор w

$$\begin{cases} x = \frac{d}{2} - d\xi_1 \\ y = \frac{p}{2} - p\xi_2 \\ z = A \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} \omega = 0 \\ \psi = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} a = \sin \omega \cos \psi = 0 \\ b = \sin \omega \sin \psi = 0 \\ c = \cos \omega = 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$w=1. \quad (3.9)$$

Здесь и далее ξ с любым индексом – случайное число, распределённое равномерно в интервале от нуля до единицы

Замечание. При необходимости учёта углового распределения излучения вносится корректирующая поправка в весовой фактор.

Второй этап. В сумматор разыгранных историй добавляется единица $i=i+1$. Обнуляется счётчик взаимодействий k . Обнуляется локальный сумматор энергии, переданной детектору от одного разыгранного фотона E_s . Розыгрыш энергии фотона тормозного излучения E методом обратных функций

$$i=i+1. \quad (3.10)$$

$$k=0. \quad (3.11)$$

$$E_s = 0. \quad (3.12)$$

$$E = F^{-1}(\xi) = \text{spline}(\mathbf{a}_f, \mathbf{b}_f, \mathbf{c}_f, \mathbf{d}_f, \xi), \quad (3.13)$$

здесь $\mathbf{a}_f, \mathbf{b}_f, \mathbf{c}_f, \mathbf{d}_f$ – столбцы параметров сплайн-интерполяции для аппроксимации функции F^{-1} ; spline – функция, возвращающая значение сплайна по заданному значению аргумента.

Третий этап. Вычисляются значения ЛКО $\mu_{tot}(E), \mu_{foto}(E), \mu_C(E), \mu_K(E)$ и $\mu_{par}(E)$ для материала ОК

$$\mu_{tot}(E) = \text{spline}(\mathbf{a}_{tot}, \mathbf{b}_{tot}, \mathbf{c}_{tot}, \mathbf{d}_{tot}, E) . \quad (3.14)$$

$$\mu_{foto}(E) = \text{spline}(\mathbf{a}_{foto}, \mathbf{b}_{foto}, \mathbf{c}_{foto}, \mathbf{d}_{foto}, E) . \quad (3.15)$$

$$\mu_K(E) = \text{spline}(\mathbf{a}_K, \mathbf{b}_K, \mathbf{c}_K, \mathbf{d}_K, E) . \quad (3.16)$$

$$\mu_C(E) = \text{spline}(\mathbf{a}_C, \mathbf{b}_C, \mathbf{c}_C, \mathbf{d}_C, E) . \quad (3.17)$$

$$\mu_{par}(E) = \text{spline}(\mathbf{a}_{par}, \mathbf{b}_{par}, \mathbf{c}_{par}, \mathbf{d}_{par}, E) . \quad (3.18)$$

Четвёртый этап. Вычисляется расстояние l_h от точки взаимодействия (входа в объект) до точки гипотетического вылета фотона из объекта контроля и определение координат точки гипотетического вылета фотона из ОК, как точки пересечения прямолинейной траектории движения фотона с поверхностью \mathbf{S}

$$l_h = \text{line}(a, b, c, x, y, z), \quad (3.19)$$

$$\begin{cases} x_h = x + al_h \\ y_h = y + bl_h \\ z_h = z + cl_h \end{cases} , \quad (3.20)$$

здесь line – подпрограмма для вычисления l_h .

Пятый этап. Обновляется счётчик взаимодействий k

$$k = k + 1 . \quad (3.21)$$

Если значение счётчика взаимодействий k превышает ранее заданное значение k_{\max} , то осуществляется переход к двадцать четвёртому этапу. В противном случае разыгрывается пробег фотона l при условии его взаимодействия до точки гипотетического вылета. Производится коррекция весового фактора w

$$w = w \left(1 - e^{-\mu_{tot}(E)l_h} \right), \quad (3.22)$$

$$l = -\frac{1}{\mu_{tot}(E)} \ln\left(1 - \xi\left(1 - e^{-\mu_{tot}(E)l_h}\right)\right). \quad (3.23)$$

Отметим, что любое повторение одних и тех же вычислений не допускается. Для устранения возможных повторений вводятся необходимые дополнительные идентификаторы. Учёт данного замечания позволяет избежать дополнительных временных затрат на моделирование.

Шестой этап. Вычисление координат точки взаимодействия

$$\begin{cases} x = x + al \\ y = y + bl \\ z = z + cl \end{cases}. \quad (3.24)$$

Седьмой этап. Определяется вид взаимодействия фотона с материалом. Если энергия фотона не превышает уровень 1,022 МэВ, то принятие решения о виде взаимодействия случайно и осуществляется согласно следующей последовательности формул

$$\xi \leq \frac{\mu_{foto}(E)}{\mu_{tot}(E)} \rightarrow \text{фотоэффект}, \quad (4.25)$$

$$\frac{\mu_{foto}(E)}{\mu_{tot}(E)} < \xi \leq \frac{\mu_{foto}(E) + \mu_C(E)}{\mu_{tot}(E)} \rightarrow \text{эффект Комптона}, \quad (3.26)$$

$$\xi > \frac{\mu_{foto}(E) + \mu_C(E)}{\mu_{tot}(E)} \rightarrow \text{эффект Релея}. \quad (3.27)$$

В случае превышения энергией фотона уровня 1,022 МэВ формула (3.27) трансформируется и вводится дополнительное выражение – проверка

$$\frac{\mu_{foto}(E) + \mu_C(E)}{\mu_{tot}(E)} < \xi \leq \frac{\mu_{foto}(E) + \mu_C(E) + \mu_K(E)}{\mu_{tot}(E)} \rightarrow \text{эффект Релея}, \quad (3.27^*)$$

$$\frac{\mu_{foto}(E) + \mu_C(E) + \mu_K(E)}{\mu_{tot}(E)} < \xi \rightarrow \text{эффект рождения пар}. \quad (3.28)$$

Восьмой этап. При развитии событий по сценарию фотоэффекта осуществляется переход к десятому этапу.

Девятый этап. В случае принятия решения в пользу эффекта Релея

производится розыгрыш направления движения вторичного фотона. Розыгрыш сводится к определению косинуса полярного угла θ и азимутального угла φ . Энергия вторичного фотона относительно первичного фотона E не изменится.

$$E=E, \quad (3.29)$$

$$\cos\theta = 1 - 2\xi, \quad (3.30)$$

$$\varphi = 2\pi\xi. \quad (3.31)$$

Далее осуществляется переход к четырнадцатому этапу.

Напомним про замечание относительно повторяющихся вычислений относительно многократно встречающегося в программе произведения 2π .

Десятый этап. Разыгрываются направления траекторий вторичных электронов с энергией E , что сводится к определению косинуса полярного угла θ_e и азимутального угла φ_e

$$E_e=E, \quad (3.32)$$

$$\cos\theta_e = 1 - 2\xi, \quad (3.33)$$

$$\varphi_e = 2\pi\xi. \quad (3.34)$$

Формулы (3.33), (3.34) приведены в предположении изотропного характера вылета вторичных электронов в случае поглощения фотона. Ожидать поляризации электронов не приходится, поэтому уточнение может коснуться лишь формулы (3.33).

Далее осуществляется переход к двенадцатому этапу.

Одиннадцатый этап. В случае развития событий по сценарию эффекта Комптона осуществляется розыгрыш косинуса азимутального угла θ и азимутального угла φ , и вычисляется энергия вторичного фотона E

$$\cos\theta = \text{foton}(E, \cos\theta), \quad (3.35)$$

$$\varphi = 2\pi\xi, \quad (3.36)$$

$$E = \frac{E_{old}}{1 - 2 \frac{E_{old}}{0,511} (1 - \cos\theta)}, \quad (3.37)$$

здесь *foton* – подпрограмма розыгрыша косинуса угла между направлением движения исходного и вторичного фотонов.

Индекс «*old*» соотносится с предыдущим состоянием фотона.

Двенадцатый этап. Разыгрывается косинус полярного угла θ_e и азимутальный угол φ_e и вычисляется энергия вторичных электронов

$$\cos\theta_e = \text{electron}(E, \cos\theta), \quad (3.38)$$

$$\varphi_e = 2\pi\xi, \quad (3.39)$$

$$E_e = E - E_{old}, \quad (3.40)$$

здесь *electron* – подпрограмма розыгрыша косинуса угла между направлением движения исходного фотона и направлением движения вторичного электрона.

Переход к пятнадцатому этапу.

Тринадцатый этап. В случае выпадения в розыгрыше эффекта рождения пар, то разыгрывается косинус полярного угла θ и азимутальный угол φ для вторичных фотонов с энергией E . Осуществляется корректировка весового фактора фотонов

$$\cos\theta = \text{foton}(E, \cos\theta), \quad (3.41)$$

$$\varphi = 2\pi\xi, \quad (3.42)$$

$$E=0,511 \text{ МэВ}, \quad (3.43)$$

$$w=2w. \quad (3.44)$$

Четырнадцатый этап. Разыгрывается направление движения вторичного электрона – косинус полярного угла θ_e и азимутальный угол φ_e . Вычисляется энергия вторичных электронов

$$\cos\theta_e = 1 - 2\xi, \quad (3.45)$$

$$\varphi_e = 2\pi\xi, \quad (3.46)$$

$$E_e = E - 1,022, \quad (3.47)$$

Вместо формулы (3.45) может быть осуществлён розыгрыш косинуса полярного угла θ_e согласно углового распределения движения вторичных электронов в процессе рождения пар, если угловое распределение отличается

от изотропного распределения.

Пятнадцатый этап. Компоненты единичного вектора направления движения вторичного электрона вычисляются по формулам

$$\begin{cases} a_e = a \cos \theta_e - (b \sin \varphi_e + a c \cos \varphi_e) \sqrt{\frac{1 - \cos \theta_e^2}{1 - c^2}} \\ b_e = b \cos \theta_e + (a \sin \varphi_e + b c \cos \varphi_e) \sqrt{\frac{1 - \cos \theta_e^2}{1 - c^2}} \\ c_e = c \cos \theta_e + (1 - c^2) \cos \varphi_e \sqrt{\frac{1 - \cos \theta_e^2}{1 - c^2}} \end{cases} . \quad (3.48)$$

Учтём замечание о повторяющихся вычислениях применительно к формуле (3.48) с целью увеличения производительности моделирования.

Шестнадцатый этап. Определяется расстояние l_e от точки образования вторичного электрона до точки гипотетического вылета вторичного электрона из объекта контроля и вычисляются координаты этой точки, как точки пересечения прямолинейной траектории движения электрона с поверхностью S

$$l_e = \text{line}(a, b, c, x, y, z), \quad (3.49)$$

$$\begin{cases} x_e = x + a l_e \\ y_e = y + b l_e \\ z_e = z + c l_e \end{cases} , \quad (3.50)$$

здесь line – та же подпрограмма для вычисления l_e , что и в (3.19), она отличается аргументами.

Семнадцатый этап. Вычисляется энергия E_{eS} , которую может передать вторичный электрон детектору в приближении непрерывного замедления [15]

$$E_{eS} = E_e - \min \{ D(E_e) l_e, E_e \}. \quad (3.51)$$

Восемнадцатый этап. Увеличение локального сумматора поглощённой энергии от зарегистрированного фотона $E_S = E_S + E_{eS} w$.

Напомним, что необходимость в применении восемнадцатого этапа и

формулы (3.51) и аналогичных ей выражений возникает в редких случаях при анализе тонких эффектов, связанных с анализом разрешающей способности систем ЦР и РВТ на уровне десятков микрометров и менее. При вычислениях необходимо учесть координаты точки попадания электрона на линейку детекторов.

Девятнадцатый этап. Если произошло взаимодействие фотона с веществом по сценарию фотоэффекта или $k > k_{max}$, то переход к двадцать второму этапу.

Двадцатый этап. Вычисление единичного вектора нового направления движения фотона через единичный вектор старого направления (индекс – *old*)

$$\begin{cases} a = a_{old} \cos\theta - (b_{old} \sin\varphi + a_{old} c_{old} \cos\varphi) \sqrt{\frac{1 - \cos\theta^2}{1 - c_{old}^2}} \\ b = b_{old} \cos\theta + (a_{old} \sin\varphi + b_{old} c_{old} \cos\varphi) \sqrt{\frac{1 - \cos\theta^2}{1 - c_{old}^2}} \\ c = c_{old} \cos\theta + (1 - c_{old}^2) \cos\varphi \sqrt{\frac{1 - \cos\theta^2}{1 - c_{old}^2}} \end{cases} \quad (3.52)$$

При вычислениях в формулах (3.52) необходимо учитывать замечание к формулам (3.48)

Двадцать первый этап. Переход к четвёртому этапу.

Двадцать второй этап. Увеличение промежуточного сумматора энергий рассеянного излучения ΣE_S и квадратов энергий рассеянного излучения ΣE_S^2

$$\Sigma E_S = \Sigma E_S + E_S w. \quad (3.53)$$

$$\Sigma E_S^2 = \Sigma E_S^2 + E_S^2 w. \quad (3.54)$$

Отметим, что определяющее значение имеет корректное вычисление весового множителя (множителей). Предлагаемый алгоритм может использоваться для усреднённого вычисления энергетического

коэффициента накопления излучения или для вычисления его для каждого детектора линейки.

Двадцать третий этап. Переход к первому этапу.

Двадцать четвёртый этап. Вычисление энергетического коэффициента накопления

$$B_{\text{э}} = 1 + \frac{I_S}{I_N} = 1 + \frac{\sum E_S}{I_N}, \quad (3.55)$$

В (3.55) I_N сигнал, формируемый фотонами, не испытавшими взаимодействие с материалом объекта контроля. Указанный сигнал вычисляется по традиционным формулам [27], и процесс вычислений не представляет сложностей.

Двадцать пятый этап. Конец вычислений.

3.4 Заключение к разделу 3

Совокупность выражений (3.1)–(3.55) представляет собой полноценную модель описания процесса переноса тормозного излучения с целью оценки энергетического коэффициента накопления излучения для любой ширины раскрытия щелевого коллиматора.

Отметим, что помимо оценки $B_{\text{э}}$ предлагаемая имитационная модель может быть использована для формирования радиографических изображений в ЦР и проекций РВТ с возможностью определения радиационного контраста и пространственного разрешения.

4 Выбор параметров щелевых коллиматоров в ЦР и РВТ

Результаты, приведённые выше, позволяют выбрать ширину щели коллиматора, исходя из потребительских параметров систем ЦР и РВТ.

В работе [48] предложен подход к выбору параметров щелевых коллиматоров, включая выбор толщины коллиматора. Остановимся на нём подробнее. Разумно представить внутреннюю поверхность щелевого коллиматора ИТИ в качестве источника вторичного фотонного излучения. В

системах ЦР и РВТ, предназначенных для контроля крупногабаритных объектов, применяются коллиматоры со значительной степенью коллимации. Из сказанного выше следует, что вклад вторичного источника излучения в регистрируемый сигнал может быть существенным. Указанный вклад необходимо ограничить.

Первый подход к ограничению описанного выше вклада связан с надлежащим выбором толщины коллиматора. Рассмотрим этот подход.

4.1 Выбор толщины коллиматора

Ограничим вклад вторичного излучения некоторым уровнем β . Рассмотрим в качестве ОК прямоугольный параллелепипед с размерами $H \times L \times L$. Пусть больший размер щели соразмерен с поперечным размером ОК. Ограничение на раскрытие щели коллиматора d с толщиной h_K и связь этих параметров с уровнем вклада дополнительного излучения β описывается соотношением

$$\frac{L}{d} e^{-\mu_K h_K} B_K(h_K) \leq \beta, \quad (4.1)$$

где μ_K , B_K – эффективные ЛКО и энергетический коэффициент накопления для тормозного излучения и материала коллиматора и соответствующий энергетический коэффициент накопления излучения. В литературе используются различные аппроксимационные зависимости B от толщины ослабляющего барьера.

Наиболее распространено и удобно в практическом применении линейное приближение

$$B(\mu h) = 1 + k\mu h, \quad (4.2)$$

здесь k – коэффициент аппроксимации, который зависит от энергии излучения и атомного номера ослабляющего материала.

Из (4.1) и аппроксимации (4.2) выводится уравнение для оценки минимального значения h_K , для которого выполняется ограничение (4.1)

$$e^{-x}(1+kx) = \beta \frac{d}{L}, x = \mu_K h_K. \quad (4.3)$$

Уравнение (4.3) является нелинейным. Решение таких уравнений находится методами Ньютона, секущих и простой итерации. Конкретное уравнение легко разрешимо методом простой итерации. Итерационная формула для вычисления вспомогательной величины x записывается следующим образом

$$x_{m+1} = \ln(1+kx_m) - \ln\left(\beta \frac{d}{L}\right), x_0 = -\ln\left(\beta \frac{d}{L}\right). \quad (4.4)$$

где m – номер итерации. Итерационный процесс, описываемой формулой (4.4), сходится за несколько итераций, причём достигается точность порядка 0,05 – 0,1 %, этого достаточно для основных практических приложений.

В таблице 4.1 приведены результаты расчетов минимального значения $\rho_K h_K$, удовлетворяющего условию (4.2), для объекта с размерами $H \times L \times L$ ($H=L=400$ мм) с плотностью материала ОК – 2,0 г/см³, эффективный атомный номер – 6. Ширина раскрытия щелевого коллиматора d выбиралась в соответствии с подходом, изложенным в разделе 2, и частично с помощью данных из таблицы 4.1, вклад рассеяния в интегральный поток регистрируемого излучения не превосходит 0,1. Изменяли максимальную энергию тормозного излучения E_{\max} и материал коллиматора. Анализ данных, представленных в таблице 4.1 показал, что для средних уровней максимальных энергий тормозного излучения ($E_{\max}=2-4$ МэВ) массовые толщины и, следовательно, весовые характеристики коллиматоров из легких и тяжелых материалов сравнимы, а для уровней максимальных энергий E_{\max} , которые превышают 6 МэВ коллиматоры из свинца или вольфрама являются более предпочтительными.

Таблица 4.1 – Толщина коллиматора, $\rho_K h_K$, г/см²

Материал	E_{\max} , МэВ					
	1	2	4	6	7,5	10
H ₂ O	133	180	250	299	333	353
SiO ₂	160	216	286	319	340	351
Fe	147	198	254	255	256	256
Pb	122	184	190	175	163	152
W	125	185	197	179	169	156

4.2 Выбор ширины раскрытия щели коллиматора

Выше отмечено, что степень уменьшения влияния рассеяния определяется не собственно физическим размером щели d , а размером тени щели на фронтальной поверхности ОК d_0 .

Пусть коллиматор расположен в непосредственной близости от ИТИ. Для этого случая формула, связывающая геометрические характеристики щелевого коллиматора и расстояние от ИТИ до ОК – A , имеет вид

$$d = \frac{d_0 h_K}{A}. \quad (4.5)$$

В таблице 4.2 приведены значения ширины раскрытия щелевого коллиматора для данных из таблицы 4.1.

Таблица 4.2 Ширина коллиматора, d , мм

Материал	E_{\max} , МэВ					
	1	2	4	6	7,5	10
H ₂ O	18	24	33	40	44	47
SiO ₂	8,2	11,1	14,7	16,4	17,5	18
Fe	2,6	3,5	4,3	4,5	4,5	4,4
Pb	1,4	2,2	2,3	2,1	1,9	1,8
W	0,9	1,3	1,4	1,3	1,2	1,1

Из анализа полученных результатов следует, что для тяжелых материалов значение параметра d для близкого расположения коллиматора и ИТИ должно быть выбрано из диапазона от 1 до 2 мм. Выбор такого

значения ширины раскрытия щели создаёт определённые сложности при настройке взаимной ориентации ИТИ, ДТИ и щелевого коллиматора. Отмеченные сложности становятся менее значимыми при удалении коллиматора от ИТИ на некоторое расстояние.

4.3 Конструкции неоднородных коллиматоров

Напомним, что коллиматоры в ЦР и РВТ предназначены для уменьшения вклада излучения, рассеянного в объекте контроля, в интегральный поток регистрируемого излучения и уменьшения дозовой нагрузки на ОК, электронные компоненты системы управления и регистрирующей аппаратуры вне зоны испытаний. Степень снижения влияния рассеяния на качество контроля определяется не только шириной щели и толщиной коллиматора, но и его конструкцией [49].

На рисунке 4.1 приведена схема формирования изображения ЦР и проекций РВТ с указанием основных параметров. К основным параметрам схемы контроля относятся:

- эффективный диаметр фокусного пятна ИТИ – l ;
- расстояние от источника излучения до лобовой поверхности коллиматора – A ;
- толщина коллиматора – h_K ;
- размер щели в направлении сканирования – d ;
- расстояние от ИТИ до ДТИ – F ;
- размер детектора в направлении сканирования и его толщина – d_0, h_d ;
- число детекторов в линейке – n ;
- длина коллиматора – B .

В линейных детекторах тормозного излучения, используемых в системах ЦР и РВТ, детекторы плотно упакованы в линейку. Поэтому дополнительной характеристикой является длина этой линейки $c=nd_0$.

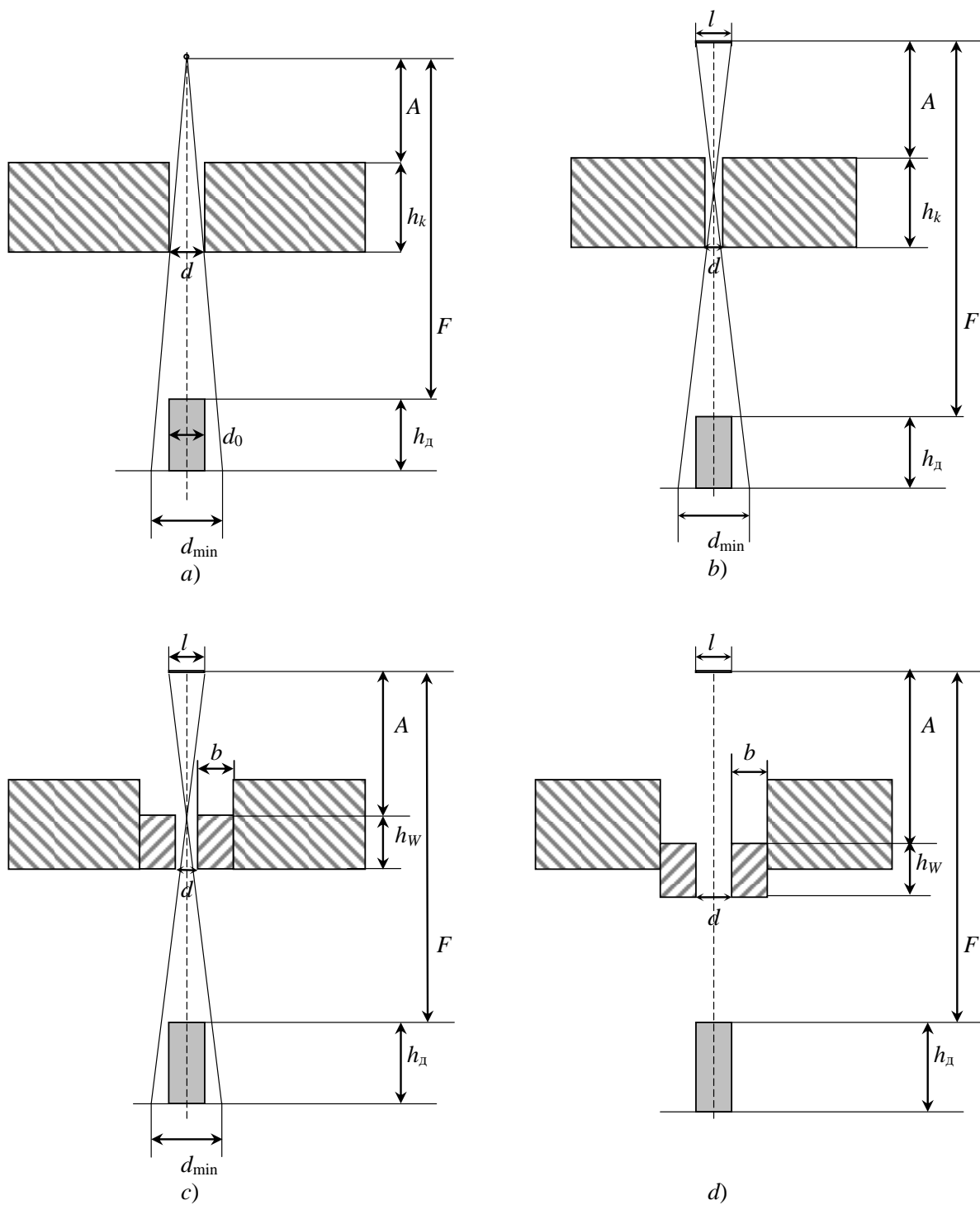


Рисунок 4.1 Геометрические схемы выбора размеров коллиматоров:
 а) источник излучения точечный, изотропный, однородный коллиматор; б) источник излучения плоский диаметром l , однородный коллиматор; в) источник излучения плоский диаметром l , неоднородный коллиматор; д) источник излучения плоский диаметром l , неоднородный коллиматор со смещением фрагментов

Выше достаточно подробно обсуждены вопросы, связанные с выбором ширины щели и толщины щелевого коллиматора. Фокусное

расстояние и размеры элементарного детектора линейки задаются заранее, исходя из простейших соображений.

Коррекция выбора раскрытия щели коллиматора. Коррекция выбора раскрытия щели коллиматора осуществляется с учётом дополнительных параметров, отмеченных на рисунке 4.1. одним из таких параметров является d_{\min} – минимальный размер зоны, свободной от электронных схем, в направлении сканирования. Естественно допустить, размеры детектора и указанного параметра соотносятся следующим образом – $d_{\min} > d_0$. Исходя из простейших геометрических соображений подробно опишем связь параметров схемы контроля для точечного ИТИ

$$(A + h_K) / (F + h_D) = d / d_{\min} . \quad (4.6)$$

Из выражения (4.6) найдём раскрытие щели коллиматора

$$d = d_{\min} (A + h_K) / (F + h_D) . \quad (4.7)$$

Модели ИТИ не исчерпываются моделью точечного изотропного источника. В ряде случаев более приемлемой моделью ИТИ является плоский ограниченный источник с диаметром l . На диаметр источника накладываем ограничение – диаметр излучателя не должен быть больше эффективного поперечного размера коллиматора. Это ограничение связано с эффективностью ИТИ и необходимостью достижения высокого геометрического разрешения. В этом случае уравнение связи параметров геометрической схемы, представленной на рисунке 4.1.b, имеет вид

$$(A + h_K) / (F + h_D) = (d + l) / (d_{\min} + l) . \quad (4.8)$$

Из формулы (4.8) определяется максимальная ширина щели коллиматора d

$$d = (d_{\min} + l) (A + h_K) / (F + h_D) - l . \quad (4.9)$$

Выражение (4.9) является более общим, поэтому для выбора искомых параметров геометрической схемы логично использовать именно его.

Замечание 1. Системы ЦР и РВТ на основе ИТИ должны соответствовать НРБ. Нормы радиационной безопасности обуславливают

необходимость применения защиты. В простейшем случае коллиматор представляет собой щель в защите. В качестве радиационно-защитных материалов используют свинец и его сплавы, а также более эффективные материалы на основе вольфрама и его сплавов. Применение вольфрама ограничивается высокой стоимостью данного материала. Стоимость вольфрама и сплавов существенно выше, чем свинца и сплавов. В качестве компромисса может выступить применение неоднородных коллиматоров из свинца с вольфрамовыми вставками, смотри рисунок 1.с. Толщина вставки из вольфрама h_w существенно меньше, чем толщина защиты из свинца h_{Pb} , что связано с большей плотностью вольфрама по сравнению с плотностью свинца. Толщина вольфрамовой вставки обеспечивает необходимый уровень ослабления, соответствующий защите из свинца. Для расчётов могут быть использованы ЛКО и энергетические коэффициенты накопления излучения из работы [4]. Применительно к рассматриваемому случаю на ограничение вклада рассеяния в интегральные сигналы оказывает ширина стенки вольфрамовой вставки – b .

Замечание 2. Выше отмечено, что для тяжелых материалов раскрытие щели коллиматора мало при $A \approx 0$. Технологически сложно изготовить щели с малым раскрытием в металлах. Такой недостаток компенсируется двумя способами: удалением коллиматора и особенно вольфрамовой вставки от ИТИ; увеличением размера зоны потребительского интереса.

Выбор ширины стенки вольфрамовой вставки. Выбор анализируемого параметра осуществляется на основе анализа прочностных или экономических показателей материала. Особенности взаимодействия фотонного излучения с веществом позволяют констатировать наличие одного физического процесса, который негативно влияет на качество контроля. Учёт этого фактора приводит к установлению минимального значения искомого размера. Опишем негативный процесс. Часть исходных фотонов в результате взаимодействия с материалом коллиматора трансформируется в поток

вторичного излучения, который при его регистрации детектором приводит к смещению информативных сигналов. Указанный процесс можно назвать натеканием излучения со стенок коллиматора или альбеда. Известно, что с возрастанием атомного номера рассеивающего материала альбеда уменьшается. Использование вставки из вольфрама приводит к положительному эффекту, так как вольфрамовая вставка поглощает большую часть фотонов, которые рассеиваются в защите.

Формула для вычисления ширины стенки вольфрамовой вставки h_w имеет вид

$$b = (h_{Pb} - h_w)d/h_w. \quad (4.10)$$

Выражение (4.1) выведено для случая отсутствия смещения задних поверхностей защиты и вольфрамовой вставки. Смещение вставки по направлению к ОК на величину Δ , рисунок 4.1.d, приводит к трансформации выражения (4.10)

$$b^* = (h_{Pb} - h_w + \Delta)d/h_w. \quad (4.11)$$

Выражения (4.10), (4.11) позволяют осуществить выбор анализируемого параметра.

Формула (4.11) вычислить ширину стенки вставки для максимального смещения вольфрамовой вставки $b^* = d\rho_w/\rho_{Pb} \approx 1.7d$. При малых значениях d расчетное значение b^* также будет мало. В этой ситуации на первый план выступает необходимость поддержания прочности.

Выбор длины щели коллиматора. Очевидно, что длина щели коллиматора B выбирается из условия перекрытия тенью щели всех детекторов линейки, при этом тень ОК не должна выходить за пределы линейки детекторов. Формула для нахождения B имеет вид

$$B = L(A + h_w)/(F - H). \quad (4.12)$$

Замечание 3. При проектировании коллиматоров со вставками необходимо учитывать массу вольфрамовых вставок, так как она влияет на экономические характеристики проектируемых систем ЦР и РВТ.

Расчет массы вольфрамовой вставки. Масса вольфрамовой вставки определяется толщиной коллиматора, длиной щели коллиматора, шириной стенки вольфрамовой вставки. Для простоты будем рассматривать вольфрамовую вставку в качестве единого блока с прорезной щелью. Указанный блок будет иметь размеры – $h_w \times (B + 2\delta) \times (d + 2b^*)$. Здесь δ – толщина стенки вольфрамовой вставки в направлении B . Она определяется только прочностными характеристиками вольфрама. Выражение для оценки массы вольфрамового блока M_w имеет вид

$$M_w = \rho_w h_w (B + 2\delta)(d + 2b^*). \quad (4.13)$$

В таблице 4.3 приведены результаты расчётов параметров коллиматоров с вольфрамовыми вставками

Таблица 4.3. Параметры вольфрамовой вставки: толщина коллиматора h_w ; ширина раскрытия коллиматора d ; длина щели коллиматора B ; масса вольфрамовой вставки M_w

Параметр	E_{\max} , МэВ					
	1	2	4	6	7,5	10
h_w , мм	65,9	97,6	104	94,6	89,2	82,4
d , мм	0,54	0,60	0,61	0,59	0,58	0,57
B , мм	156,8	170,4	173,1	169,1	166,8	163,9
M_w , кг	4,28	6,85	7,41	6,59	6,14	5,58

Совокупность приведённых выше результатов, алгоритма и реализующей его программы являются основой для рационального выбора эффективного коллиматора. Здесь под эффективностью коллиматора понимается соответствующая степень уменьшения негативного влияния рассеяния на качество контроля в системах ЦР и РВТ.

5. Социальная ответственность

5.1 Производственная безопасность.

Объектом исследования является коллиматор и система цифровой радиографии. Массив данных получается путем воздействия ионизирующего излучения с объектом, и регистрацией данного излучения детекторной матрицей. Далее производится обработка массива на персональном компьютере. При проведении данных процедур имеют место следующие факторы.

Таблица 5.1 – Опасные и вредные факторы возникающие при выполнении работ по математической коррекции апертурных искажений при получении массива экспериментальных данных.

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работы по получению изображения: 1) Установка оборудования; 2) Подключение оборудования к питающей сети; 3) Экспозиция;	1. Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне;	1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; 2. Повышенный уровень статического электричества	1) СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)" 2) ГОСТ Р 12.1.019-2009
Работы по обработке полученной информации: 1) работа за персональным компьютером;	1. Физические статические перегрузки; 2. Умственное перенапряжение; 3. Повышенный уровень электромагнитного излучения 4. Недостаточное освещение рабочей зоны 5. Отклонение показаний микроклимата	1. Электрический ток	СанПиН 2.2.4/2.1.8.562-96 СанПиН 2.2.4.1191-03 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03

В одной из частей работы используется источник ионизирующего излучения. Этим источником является рентген аппарат, который в свою очередь относится к электроустановкам. Проведение работ на электроустановках осуществляется в строгом соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей», «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилами техники безопасности и производственной санитарии в электронной промышленности». Последние учитывают особенности отрасли и специфику радиоэлектронного оборудования. Все вышеуказанные «Правила» распространяются на работы с действующими электроустановками и радиоэлектронным оборудованием. Персоналу работающему с электроустановками до 1000 В должен быть присвоен I квалификационная группа допуска к эксплуатации электроустановок. Всё используемое оборудование должно быть исправно и заземлено. Помещения, где размещаются рабочие места с ПЭВМ, должны быть оборудованы защитным заземлением (занулением) в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации.

Не следует размещать рабочие места с ПЭВМ вблизи силовых кабелей и вводов, высоковольтных трансформаторов, технологического оборудования, создающего помехи в работе ПЭВМ.

При работе с источниками ионизирующих излучений необходимо соблюдать нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009. В свою очередь необходимо обеспечить радиационную защиту персонала в виде толстых стен и дверей. Также опасность могут представлять озон и окислы азота, образующиеся в результате радиолиза воздуха под действием рентгеновского излучения. По этой причине рабочее помещение должно быть оборудовано вытяжкой. Для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

- непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);
- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учётом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

В данном случае персонал относится к группе А и предел получаемой дозы составляет 20 мЗв в год.[СанПиН 2.6.1.2523–09 НРБ 99/2009]

Превышение дозы радиации может привести к угнетению иммунной системы организма и сделать его восприимчивым к различным заболеваниям. При облучении повышается также вероятность появления злокачественных опухолей.

Основная часть исследовательской работы будет проводиться за персональным компьютером. Помещения, в которых будет проводиться работа за компьютером должны иметь естественное и искусственное освещение. Освещенность на поверхности стола в зоне работы должна быть 300 – 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%. [СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03].

Работая при освещении плохого качества или низких уровнях, люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, что приводит к снижению работоспособности. В ряде случаев это может привести к головным болям. Причинами во многих случаях являются слишком низкие уровни освещенности, слепящее действие источников света и соотношение яркостей. Головные боли также могут быть вызваны пульсацией освещения. Таким

образом, становится очевидно, что неправильное освещение представляет значительную угрозу для здоровья

Расположение рабочих мест за мониторами для пользователей в подвальных помещениях не допускается. Площадь на одно рабочее место с компьютером для пользователей должна составлять не менее $4,5\text{м}^2$. Помещения с компьютерами должны оборудоваться системами отопления, кондиционирования воздуха или эффективной приточно-вытяжной вентиляцией. Для внутренней отделки интерьера помещений с компьютерами должны использоваться диффузно-отражающие материалы с коэффициентом отражения для потолка — 0,7-0,8; для стен — 0,5-0,6; для пола — 0,3-0,5. Поверхность пола в помещениях эксплуатации компьютеров должна быть ровной, без выбоин, нескользкой, удобной для очистки и влажной уборки, обладать антистатическими свойствами. В помещении должны находиться аптечка первой медицинской помощи, углекислотный огнетушитель для тушения пожара.

Мероприятия по доведению микроклиматических показателей до нормативных значений включаются в комплексные планы предприятий по охране труда. Для создания благоприятных условий работы, соответствующих физиологическим потребностям человеческого организма, санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения. Рабочая зона ограничивается высотой 2,2 м над уровнем пола, где находится рабочее место. При этом нормируются: температура, относительная влажность и скорость движения воздуха (СанПиН 2.2.4.548 – 96).

Неблагоприятные значения микроклиматических показателей могут стать причиной снижения производственных показателей в работе, привести к таким заболеваниям работающих как различные формы простуды, радикулит, хронический бронхит, тонзиллит и др.

Контроль электромагнитной обстановки на рабочих местах пользователей ПЭВМ производится органами ГСЭН и (или) испытательными лабораториями (центрами), аккредитованными в установленном порядке. Измерение электромагнитных параметров должны проводиться в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и соответствовать допустимым уровням. Напряженность электрического поля менее 25 В\м; плотность магнитного потока менее 250 нТл. Биологический эффект ЭМП в условиях длительного многолетнего воздействия накапливается, в результате возможно развитие отдаленных последствий, включая дегенеративные процессы центральной нервной системы, рак крови (лейкозы), опухоли мозга, гормональные заболевания.

Режим труда и отдыха предусматривает соблюдение определенной длительности непрерывной работы на ПК и перерывов, регламентированных с учетом продолжительности рабочей смены, видов и категории трудовой деятельности. В данном случае персонал относится к группе В2. (время работы до четырёх часов). Продолжительность непрерывной работы на ПК без регламентированного перерыва не должна превышать 2 часа.

5.2. Экологическая безопасность

Рентген аппараты имеют определенный ресурс работы, после его израсходования аппарат необходимо утилизировать в соответствии с ГОСТ Р 53692-2009. Для утилизации необходимо обратиться в специализированную организацию, которая имеет лицензию от Роспотребнадзора на осуществление данной деятельности. Наличие ионизирующего излучения не будет влиять на окружающую среду, т.к. предполагается что работы проводятся в лабораторных условиях с обеспечением необходимой радиационной защиты.

5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Для работы оборудования необходимо электричество. В ходе эксплуатации электрооборудования необходимо соблюдать правила электропожаробезопасности: пользоваться исправным электрооборудованием, питать электрооборудование регламентированным напряжением питания, избегать перегрузок сети. В случае возгорания электрооборудования следует: отключить питание установки, включить пожарную тревогу, вызвать сотрудников пожарной службы по телефону 01 или 010 (для сотового телефона), провести эвакуацию и оповещение сотрудников. Тушить пожар электрооборудования разрешено тушить порошковым огнетушителем.

В случае поражения током следует освободить пострадавшего от действия электрического тока, то есть отключить цепь тока, выключить рубильник и т.д. В случае отдаленности выключателя от места происшествия, следует перерезать провода или отбросить сухой палкой оборвавшийся конец провода.

Необходимо помнить, что сам пострадавший может являться проводником электрического тока. Также необходимо вызвать скорую помощь, по телефону 03 или 030 (для сотового телефона)

5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К работе с источниками ионизирующих излучений допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие противопоказаний по здоровью, прошедшие инструктаж по технике безопасности, пожарной безопасности и радиационной безопасности. Работа с ИИИ производится в специально оснащённом помещении.

Продолжительность непрерывной работы за компьютером без регламентированного перерыва не должна превышать 2 часов. Рекомендуется делать перерывы в работе за ПК продолжительностью 10

минут через каждые 50 минут работы. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600..700 мм, но не ближе 500. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100..300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной поверхности, отделенной от основной столешницы. В помещениях должна проводиться ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы. Шумящее оборудование (печатающие устройства, сканеры, серверы и тому подобные), уровни шума которого превышают нормативные, должно размещаться вне рабочих мест сотрудников.

6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

6.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Целевым рынком данной разработки являются организации использующие источники ионизирующего излучения, применяемые в неразрушающем контроле или досмотровых комплексах. Исходя из того, что данная разработка может выполнять две функции: первая – это уменьшать вклад ионизирующего излучения, рассеянного в объекте контроля, в интегральный поток регистрируемого излучения, вторая – уменьшать дозовую нагрузку на объект контроля, электронные компоненты системы управления, регистрирующую аппаратуру и персонал.

Так как результатом работы будет являться система рекомендаций по выбору конструкций щелевого коллиматора, то данной разработкой будут больше заинтересованы организации производящие установки для досмотровых комплексов, так как данная разработка позволит снизить дозовую нагрузку на персонал и оборудование. Уменьшение вклада рассеянного излучения положительно влияет на качество работы досмотрового комплекса. Также существует тенденция по ужесточению норм радиационной безопасности, что делает данную разработку актуальной.

В таблице 6.1 приведены основные сегменты рынка по следующим критериям: вид деятельности компании-заказчика и направление деятельности.

Таблица 6.1 – Карта сегментирования рынка

		Направление деятельности	
		Улучшение характеристик производимого оборудования	Уменьшение дозовой нагрузки на оборудование и персонал
Вид деятельности компании	Заводы по производству металлоконструкций		+
	Конструкторское бюро	+	+
	НИИ	+	+

6.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Для этого составлена оценочная карта, приведенная в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Спрос на исследование	0,15	5	4	3	0,45	0,3	0,5
2. Надежность	0,1	4	4,5	4	0,35	0,5	0,45
3. Энергоэкономичность	0,05	5	2	2	0,4	0,2	0,25
4. Безопасность исследования	0,05	5	2	3	0,45	0,45	0,4
5. Простота исследования	0,1	3	4	4,5	0,35	0,2	0,15
6. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,2	4,5	5	5	2,5	1,75	1,25
Экономические критерии оценки эффективности							
7. Цена	0,1	2	3	2,5	0,2	0,15	0,15
8. Финансовая эффективность исследования	0,25	3,5	2	1,5	0,5	0,45	0,5
Итого	1	33	31,5	30,5	3,75	3,6	3,45

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (6.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – бал i -го показателя.

Таким образом, конкурентоспособность научно-исследовательской работы составила 3.75, в то время как двух других аналогов 3.6 и 3.45 соответственно. Результаты показывают, что данная научно-исследовательская работа является конкурентоспособной и имеет преимущества по таким показателям, как энергоэкономичность, безопасность и финансовая эффективность исследования.

6.3 SWOT-анализ

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

Он проводится в несколько этапов.

1.Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Сильные стороны– это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован.

Слабые стороны. Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или

где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды.

Результаты, представленные в табличной форме (табл.6.3 – табл.6.5), призваны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. Каждый символ в таблице обозначает степень соответствия.

Таблица 6.3 – Интерактивная матрица проекта (1)

		Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4	C5
Возможности проекта	B1	+	+	+	-	-
	B2	0	+	-	-	-
	B3	+	0	+	0	-

Таблица 6.4 – Интерактивная матрица проекта (2)

		Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2	Сл3
Возможности проекта	B1	+	+	0
	B2	+	-	+
	B3	-	+	0

Таблица 6.5 – Интерактивная матрица проекта (3)

		Сильные стороны проекта				
		С1	С2	С3	С4	С5
Угрозы проекта	У1	+	0	+	-	0
	У2	-	+	+	-	-
	У3	-	-	0	+	-

Таблица 6.6 – Интерактивная матрица проекта (4)

		Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2	Сл3
Угрозы проекта	У1	0	+	0
	У2	+	0	-
	У3	+	0	+

Анализ интерактивных таблиц представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и т.д. следующего вида: В1С1С2С5; В4С1С4. Каждая из записей представляет собой направление реализации проекта.

В случае, когда две возможности сильно коррелируют с одними и теми же сильными сторонами, с большой вероятностью можно говорить об их единой природе. В этом случае, возможности описываются следующим образом: В2В3С2С3.

В результате получаем сильно коррелирующие параметры:

$V1C3C4C5, V2C2C3, V3C1C3 \Rightarrow V1V2C3, V2V3C3, V1V3C3$

$V1Cл2, V2Cл1Cл3, V3Cл1Cл3 \Rightarrow V2V3Cл1Cл2$

$U1C1C2C3, U2C1C2C3, U3C4 \Rightarrow U1U3C1C2C3$

$U2Cл1Cл3, U3Cл3 \Rightarrow U2U3Cл3$

Исходя из этих данных, получаем наиболее выгодные направления реализации проекта.

3. Составим итоговую матрицу (табл.Х) для заключительного третьего этапа, в котором будут описаны основные решения научно-исследовательского проекта.

Таблица 6.6 – Итоговая матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Наличие опытного руководителя. С2. Наличие необходимого оборудования для испытаний С3. Экономическая эффективность разработки. С4. Наличие бюджетного финансирования. С5. Отсутствие аналогичных разработок</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие средств для изготовления изделия согласно научной разработке. Сл2. Присутствие альтернативных способов улучшения характеристик оборудования Сл3. Медленный процесс вывода на рынок.</p>
<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. В2. Появление дополнительного спроса на новую технологию. В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>В1В2С3, В2В3С3, В1В3С3</p>	<p>В2В3Сл1Сл2</p>
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства. У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p>	<p>У1У2С1С2С3С5</p>	<p>У2У3Сл3</p>

Результаты SWOT–анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

6.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения).

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (6.2)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Таблица 6.7 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	4
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	3
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	4
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	3
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	4
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	3
15	Проработан механизм реализации научного проекта	3	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	53	53

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется суммарным количеством баллов. Таким образом, перспективность разработки и знания разработчика средние.

6.5. План проекта

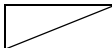
В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Таблица 6.8 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Составление и утверждение темы проекта	3			Осипов
2	Подбор и изучение материалов по теме	20			Трофимчук
3	Календарное планирование работ по теме	3			Осипов/Трофимчук
4	Изучение литературы по теме	10			Трофимчук
5	Выбор метода совершенствования коллиматора для систем сканирующей цифровой радиографии	25			Осипов/ Трофимчук
6	Получение массивов экспериментальных данных на лабораторной установке	15			Осипов/ Трофимчук
7	Оценка полученных результатов	3			Осипов/ Трофимчук

Таблица 6.9 – Календарный план-график проведения НИР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дни	Продолжительность выполнения работ												
				Фев.		Март			Апрель			Май				
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение темы проекта	Руковод.	3	/												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	20		/	/	/									
3	Календарное планирование работ по теме	Руковод., студент	3				X									
4	Изучение литературы по теме	Студент	10					/	/	/						
5	Выбор метода совершенствования коллиматора для систем сканирующей цифровой радиографии	Руковод., студент	25								/	/	/	/	/	/
6	Получение массивов экспериментальных данных на лабораторной установке	Руковод., студент	15								/	/	/	/	/	/
7	Оценка полученных результатов	Руковод., студент	3													X

 – студент  – руководитель.

6.6. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям.

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов).

6.6.1. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того статья включает так называемые транспортно–заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли–продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в указанных границах. Пример смотреть в таблице 6.10

Таблица 6.10 – Расчет затрат на спецоборудование

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол–во	Сумма, руб.
Рентгеновский аппарат РАП-220-5	250000	1 шт.	250000
Линейный детектор RID 1640	320000	1 шт.	320000
		Итого:	570000

6.6.2 Расчет основной заработной платы

Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и

тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл. 6.11.

Таблица 6.11 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнитель по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.			Зарплата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладам, тыс. руб.)		
			Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	3	2	3	0,9	0,7	1,1	2,7	1,4	3,3
2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	1	1	1	0,25	0,35	0,25	0,25	0,35	0,25
3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, студент	2	1	2	1,2	1,3	1,0	2,4	1,3	2,0
4	Изучение литературы по теме	Студент	1	2	2	0,75	0,4	0,5	0,75	0,8	1,0
5	Выбор метода совершенствования коллиматора для систем сканирующей цифровой радиографии	Руководитель, студент	3	4	2	2,1	2,2	2,0	6,3	8,8	4,0
6	Получение массивов экспериментальных данных на лабораторной установке	Руководитель, студент	5	4	6	2,5	2,8	3,1	12,5	11,2	18,6
	Оценка полученных результатов	Руководитель, студент	2	1	2	1,2	1,3	1,0	2,4	1,3	2,0
Итого									27,3	25,15	31,15

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИТ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (6.3)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

Оклад ведущего научного сотрудника, руководителя (кандидата технических наук) равна примерно 29000 рублей.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = T_p \cdot Z_{дн}, \quad (6.4)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 8);

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{де} = \frac{Z_m M}{F_d}, \quad (6.5)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot (k_{np} + k_o) \cdot k_p, \quad (6.6)$$

где Z_b – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

$k_{д}$ – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

$k_{р}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

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

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад $Z_{б}$ определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия. Размер окладов ППС и НС ТПУ представлен на корпоративном портале ТПУ: <http://portal.tpu.ru/departments/otdel/peo/documents>.

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

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Таблица 6.12 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, тыс. руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$, тыс. руб.	$Z_{дн}$, тыс. руб.	$T_{р}$, раб. дн.	$Z_{осн}$, тыс. руб.
Руководитель	29	0,3	0,3	1,3	22,6	2,73	14	38,2
Студент	6			1,3	7,8	0,73	18	13,4
Итого $Z_{осн}$								51,34

Дополнительная заработная плата исполнителей темы.

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и

общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (6.7)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы ($k_{\text{доп}}=0,15$).

6.6.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (6.8)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

22% — пенсионный фонд ;

2,9% — фонд страхования по временной нетрудоспособности;

5,1% — фонд обязательного медицинского страхования.

$k_{\text{внеб}}=0,3$

тогда, $Z_{\text{внеб}}=20,458$ тыс. руб.,

Таблица 6.13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб	Дополнительная заработная плата, тыс. руб	Отчисления во внебюджетные фонды, тыс. руб
Руководитель	43,9	6,585	15,145
Студент	15,4	2,31	5,313
Итого	8,76	8,895	20,458

6.6.4 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

Оплата работ, выполняемых сторонними организациями, включает в себя:

Услуги Internet 350 р в месяц. За 6 месяцев – 2100руб;

Распечатка 130-150 стр. – 400 руб., переплет – 60 руб.

Суммарные расходы на оплату работ, выполняемых сторонними организациями: 2560 руб.

Накладные расходы.

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

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (6.9)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией

в качестве нижнего предела затрат на разработку научно- технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в табл. 6б.

Таблица 6.14 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Примечание
1. Материальные затраты НИИ	2,56	Пункт 3.4.4
2. Затраты на спецоборудование для научных (экспериментальных) работ	570,0	Пункт 3.4.1
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	51,34	Пункт 3.4.2
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	7,7	Пункт 3.4.2 15% от ст.3
5. Отчисления во внебюджетные фонды	20,458	3.4.3
6. Накладные расходы	104,33	16 % от суммы ст. 1-5
7. Бюджет затрат НИИ	756,387	Сумма ст. 1-6

6.7. Заключение по разделу

По результатам выполненного задания для раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» было достигнуто следующее:

Были определены потенциальные потребители результатов исследования; Проведен SWOT–анализ, по результатам которого можно сделать вывод, что данная технология имеет преимущества по сравнению с имеющимися разработками. Данная разработка и имеет приемлемую стоимость. Для повышения спроса необходима активная рекламная компания;

Составлен план проекта, в соответствии с которым определяются объем работ и время, затрачиваемое на ее выполнение. Рассчитан бюджет научного исследования. Рассчитано, что для реализации проекта требуется 756387,00 рублей;

Заключение

Основным результатом работы являются оценка влияния конструкции и параметров коллиматоров на качество систем цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии.

Можно выделить ряд выводов и результатов, отмеченных в пояснительной записке к выпускной квалификационной работе:

1. Теоретически и экспериментально доказана необходимость ограничения пучка рентгеновского и тормозного излучения с целью уменьшения влияния рассеяния на качество контроля в системах цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии.

2. Предложена и апробирована методика оценки влияния излучения, рассеянного в объекте контроля, на качество контроля методом высокоэнергетической вычислительной томографии.

3. Разработан алгоритм выбора рациональных параметров щелевых коллиматоров высокоэнергетического тормозного излучения.

4. Разработан алгоритм и программа моделирования методом Монте-Карло процесса переноса тормозного излучения с целью оценки энергетического коэффициента накопления излучения для любой ширины раскрытия щелевого коллиматора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chen, G., Turner, J., Nisius, D., Holt, K., Brooks, A. Linatron Mi6, the X-Ray Source for Cargo Inspection // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 66. – P. 68–74.
2. Brandis, M. Development of a gamma-ray detector for Z-selective radiographic imaging. – Diss. Ph. D. – Hebrew University of Jerusalem, The Racah Institute of physics, 2013.
3. Zav'yalkin, F.M., Osipov, S.P. Effect of the instability of parameters of bremsstrahlung beams on the accuracy of radiometric measurements // *Soviet Journal of Nondestructive Testing*. – 1989. – Vol. 25. – No. 2. – P. 108–112.
4. Макаров, С.Ю. Статистическое моделирование переноса излучения и переходные характеристики многослойной биоткани // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. НЭ Баумана*. – 2014. – № 12. – С. 350–364.
5. Zentai, G., Partain, L. High-energy (MeV) x-ray imaging with a mercuric iodide imager // *The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. – International Society for Optics and Photonics, 2008. – P. 69351Y-1–69351Y-8.
6. Hogan, M. J. et al. Measurements of gain larger than 10^5 at $12 \mu\text{m}$ in a self-amplified spontaneous-emission free-electron laser // *Physical Review Letters*. – 1998. – Vol. 81. – No. 22. – P. 4b867–4870. (гамма-распределение)
7. Pellegrini, C., Ding, X., Rosenzweig, J. Output power control in an X-ray FEL // *Particle Accelerator Conference, 1999*. – IEEE, 1999. – Vol. 4. – P. 2504–2506.
8. Farrell J.P.; Powell J.; Murzina M.; Dudnikov V.; Ivanov A. A new vacuum insulated tandem accelerator for detection of explosives and special

nuclear materials // Nondestructive Detection and Measurement for Homeland Security III. – Proc. SPIE – 2005. – Vol. 5769. – P. 1–10.

9. Osipov, S.P., Chakhlov, S.V., Osipov, O.S., Shtein, A.M., Strugovtsev, D.V. About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2015. – Vol. 81. – no. 1. – no. paper. 012082. – 5 p.

10. Westermark, T. Energy distribution and energy stability of the electron beam from a 5 MeV betatron // Nuclear Instruments and Methods. – 1961. – Vol. 10. – P. 145–163.

11. Kaminski, P., Wronka, S. Dedicated detector for verification of X-ray energy in the linear accelerators for cargo screening and industrial radiography // Polish Journal of Medical Physics and Engineering. – 2011. – Vol. 17. – no. 3. – P. 121–128.

12. Clayton, J., Shedlock, D., Langeveld, W. G., Bharadwaj, V., Nosochkov, Y. Proposed new accelerator design for homeland security x-ray applications // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 66. – P. 249–259.

13. Regentova, E.E., Zhang, L., Mandava, A.K., Mandava, V.K., Potetti, K.K., Chen, G., Wilson, Z. Advantages and challenges of radiosopic detection of nuclear materials in cargo containers with two megavoltage energy barriers // Nuclear Technology. – 2011. – Vol. 175. – no. 1. – P. 276–285.

14. Brandis M. Development of a Gamma-ray Detector for Z-Selective Radiographic Imaging. – thesis submitted towards the Ph. D. degree at the Hebrew University of Jerusalem, The Racah Institute of physics, 2013.

15. Zav'yalkin, F.M., Osipov, S.P. Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions // Soviet Atomic Energy. – 1985. – Vol. 59. – no. 4. – P. 842–846.

16. Okulov B.V. Bremsstrahlung intensity near accelerators as a function of electron energy // *Atomic Energy*. – 1968. – Vol. 25. – no. 5. – P. 1237–1237.
17. Kuznetsov P.I. Dependence of bremsstrahlung dose on electron energy // *Atomic Energy*. – 1990. – Vol. 69. – no. 2. – P. 667–669.
18. Garrido T.C. Optimization of a linac based source of bremsstrahlung radiation. – 2010. – 85 p. URL: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10297>
19. Zav'yalkin, F.M., Lomakin, P.L., Osipov, S.P. Method of measuring the fluctuations of bremsstrahlung beam parameters // *Soviet Atomic Energy*. – 1991. – Vol. 70. – no. 1. – P. 77–80.
20. Rouse A. et al. Production of a keV X-ray beam from synchrotron radiation in relativistic laser-plasma interaction // *Physical review letters*. – 2004. – Vol. 93. – no. 13. – no. paper 135005.
21. Norreys P.A. et al. Observation of a highly directional γ -ray beam from ultrashort, ultraintense laser pulse interactions with solids // *Physics of Plasmas*. – 1999. – Vol. 6. – no. 5. – P. 2150–2156.
22. Takagi H., Murata I. Energy Spectrum Measurement of High Power and High Energy (6 and 9 MeV) Pulsed X-ray Source for Industrial Use // *Journal of Radiation Protection and Research*. – 2016. – Vol. 41. – no. 2. – P. 93–99.
23. Sandlin S. X-Ray Inspection Setups for the Disposal Canister Lid Weld // *Working Report*. – Finland: Posiva Oy, 2010.
24. Meissner J. et al. X-ray treatment at 5 MeV and above // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2000. – Vol. 57. – no. 3. – P. 647–651.
25. Lanzl L.H., Hanson A.O. Z dependence and angular distribution of bremsstrahlung from 17-MeV electrons // *Physical Review*. – 1951. – Vol. 83. – no. 5. – P. 959–974.

26. Майоров А. Н., Мамиконян С.В., Косарев Л. И., Фирстов В. Г. Радиоизотопная дефектоскопия (методы и аппаратура). - Л.: Атомиздат, 1976. - 175 с.
27. Гусев Е. А., Новицкий Ф. Н., Потапов В. Н. Параметры рентгеновского изображения с барьерной геометрией // Дефектоскопия. - 1989. - № 11 - С. 3-8.
28. Завьялкин Ф. М., Осипов С. П. Влияние коллимации источника излучения на чувствительность радиографии// Дефектоскопия. - 1983. - № 4. – С. 47-49.
29. Завьялкин Ф. М., Зубков Ю. Г., Осипов С. П. Эффективность щелевой коллимации радиометрического детектора// Дефектоскопия. - 1988.- № 3. – С. 43-46.
30. Физика визуализации изображений в медицине: В 2-х томах. Т. 1: Пер. с англ. Под ред. С. Уэбба. - М.: Мир, 1991. - 408 с. Физика визуализации изображений в медицине: В 2-х томах. Т. 1: Пер. с англ. Под ред. С. Уэбба. - М.: Мир, 1991. - 408 с.
31. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1982. - 296 с.
32. Руководство по радиационной защите для инженеров. Т. 1. Пер. с англ. Под ред. Д. Л. Бродера и др. - М.: Атомиздат, 1973. - 426 с.
33. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. - Киев: Наукова думка, 1975. - 416 с.
34. Майоров, А.А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле // Журнал «В мире НК. – 2009 – №. 3. – С. 26–37.
35. Осипов, С.П., Клименов, В.А., Батрагин, А.В., Штейн, А.М., Прищепа, И.А. Применение цифровой радиографии и рентгеновской

вычислительной томографии при исследовании строительных конструкций и в строительном материаловедении // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 6. – С. 116–127.

36. Клименов, В.А., Алхимов, Ю.В., Штейн, А.М., Касьянов, С.В., Бабилов, С.А., Батрагин, А.В., Осипов, С.П. Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики, неразрушающего контроля и инспекции // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 31–42

37. Цветкова, Н.К., Новицкая, К.А., Кологов, А.В., Смирнов, В.Г. Особенности применения комплексов цифровой радиографии при неразрушающем контроле корпусного производства // Технология машиностроения. – 2014. – № 7. – С. 47–50.

38. Москалёв Ю. А. Рентгеновские интроскопы НИИ интроскопии // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 122–124.

39. Касьянов, С.В. Применение бетатронов в радиографических досмотровых системах // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 134–138.

40. Вайнберг, Э., Цыганов, С.Г., Шаров, М.М. Опыт трехмерной компьютерной томографии // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 1. – С. 56–59.

41. Непомнящая, П.К., Карих, В.П. Рентгеновская компьютерная томография приповерхностной зоны крупногабаритных изделий из энергонасыщенных материалов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2015. – С. 76–80.

42. Прусов, Е.С. Компьютерная томография для задач трехмерного материаловедения // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5(2). – С. 318–323.

43. Ключев, В.В., Вайнберг, Э.И. Рентгеновская вычислительная томография в промышленной диагностике // Приборы и системы управления. – 1989. – № 5. – С. 10–15.
44. Удод, В.А., Ван, Я., Осипов, С.П., Чахлов, С.В., Усачёв, Е.Ю., Лебедев, М.Б., Темник, А.К. Современное состояние и перспективы развития систем цифровой рентгенографии для дефектоскопии, диагностики и досмотрового контроля объектов // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 11–28.
45. Пик, Л., Клейнбергер, О. Цифровая радиография в дефектоскопии // Мир измерений. – 2010. – № 6. – С. 12–17.
46. Капустин, В.И., Осипов, С.П. О критериях сравнения различных модификаций методов цифровой радиографии // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12. – С. 25–32.
47. Чахлов, С.В., Осипов, С.П., Темник, А.К., Удод, В.А. Современное состояние и перспективы развития рентгеновской вычислительной томографии // Дефектоскопия. – 2016. – № 4. – С. 56–70.
48. Izumi, S., Kamata, S., Satoh, K., Miyai, H. High energy X-ray computed tomography for industrial applications //IEEE transactions on nuclear science. – 1993. – Vol. 40. – no. 2. – С. 158–161.
49. Чахлов, В.Л., Сидуленко, О.А. Разработка приборов и методов неразрушающего контроля качества в НИИ интроскопии Томского политехнического университета // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т. 303. – № 1. – С. 11–132.
50. Чахлов, В.Л., Звонцов, А.А. Малогабаритные бетатроны с азимутальной вариацией управляющего магнитного поля // Известия Томского политехнического университета. – 1998. – С. 10–13.

51. Ворогушин, М.Ф. и др. Новое поколение линейных ускорителей электронов для радиографии интроскопии и томографии // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Электрофизическая аппаратура. – 2002. – № 1. – С. 27–35.
52. Завьялкин, Ф.М., Зубков, Ю.Г., Осипов, С.П. Зависимость отношения сигнал/шум от радиуса цилиндрического сцинтиллятора // Дефектоскопия. – 1984. – № 11. – С. 56–59.
53. Завьялкин, Ф.М., Осипов, С.П. Зависимость среднего значения и флуктуаций поглощенной энергии от размеров сцинтиллятора // Атомная энергия. – 1985. – Т. 59. – вып. 4 – С. 281–283.
54. Завьялкин, Ф.М., Осипов, С.П. Расчет функций рассеяния линейки сцинтилляционных детекторов // Атомная энергия. – 1986. – Т. 60. – вып. 2 – С. 146–148.
55. Касьянов, В.А., Касьянов, С.В., Осипов, С.П. Особенности регистрации высокоэнергетического тормозного излучения в досмотровом контроле // Датчики и системы. – 2006. – № 3. – С. 10–13.
56. Кольчужкин, А.М., Бойко, В.И. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т. 303. – С. 81–88.
57. Лейпунский, О.И. Распространение гамма-квантов в веществе. – М.: Гос. изд-во физико-математической лит-ры, 1960.
58. Стародубцев, С.В., Романов, А.М. Взаимодействие гамма-излучения с веществом. – М.: Наука, 1964.
59. Ермаков, С.М., Михайлов, Г.А. Статистическое моделирование. – М.: Наука, 1982.

60. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П. Оценка эффективности щелевой коллимации высокоэнергетического источника излучения при радиометрическом контроле крупногабаритных объектов // Дефектоскопия. 2006. № 2.
61. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Осипов С.П., Касьянов С.В. Щелевые и пинхольные коллиматоры в цифровой рентгенографии // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 3.
62. Сторм, Э., Исраэль, Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001-100 Мэв и элементов с 1 по 100): Справочник. – М: Атомиздат, 1973.
63. Форсайт, Дж., Малькольм, М. Моулер, К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980.
64. СанПиН 2.2.4.548-96 – Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы.
65. СНиП 23-05-95*, СП 52.13330.2011 – Естественное и искусственное освещение.
66. ГОСТ Р12.1.019-2009 – Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
67. ГОСТ12.1.030-81 – Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1).
68. НРБ-99/2009 – Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности.
69. ГОСТ Р50923-96 – Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

70. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности
(123-ФЗ от 22 июля 2008 г.

Приложение А

(справочное)

Раздел №2

Влияние рассеяния на смещение информационных характеристик полей фотонного излучения

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Трофимчук Станислав Алексеевич		

Руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Щеголихина Юлия Викторовна	к.ф.н		

2. Wirkung auf den Streueigenschaften der Verschiebungsinformationen von Strahlungsfeldern Photonen

Bei der Konzeption und PBT CR-Systeme müssen den Beitrag der Streustrahlung auf die Gesamtstrahlungsenergie Strom, der auf der Vorderseite der strahlungsempfindlichen Volumen der Detektoren wissen, wie die Höhe dieses Beitrags im Wesentlichen auf die Wahrscheinlichkeit des Erfassens Defekte abhängt [18] und Genauigkeit Auswertung OK Parameter.

2.1 Abschätzung der Effizienz der Spaltkollimation eines radiometrischen Detektors

Um den Beitrag der Streustrahlung in dem Objekt der Steuerung, Integral-Signale CR und PBT-Systeme mit Quellen von Röntgenstrahlung und Bremsstrahlung Komplexe Computertomographie (BT) und Computer-Radiographie (PB) zu reduzieren effektiv Kollimation Schlitzlinien mehrkanaligen Detektoren verwendet [19]. Am einfachsten die Auswirkungen dieses Beitrags zur Qualitätskontrolle der CR-Systeme und PBT für flache Barrieren bewertet werden. In diesem Fall ist die flache Barriere ein eher konventionelles Konzept. Wir werden den Teil der QA flache Barriere nennen, wenn der Krümmungsradius der Oberflächen dieser Teil umschließende ist viel kleiner als die Breite des OK Offenbarung Schlitzkollimator. Eine solche Definition der flachen Barriere treffen fast alle großen Objekte, natürlich mit der richtigen Ausrichtung OK und Schlitzkollimator. Die Materialien dieses Abschnitts sind eine Verallgemeinerung der Ergebnisse der [20], die zur Untersuchung der Wirksamkeit von Kollimation Schlitzdetektor gewidmet ist. In dem Papier die zwei Arten von geometrischen Grundmustern der Strahlungsquelle - isotrope Punkt und flach mono-direktional. Solche geometrischen Modelle werden in der Anfangsphase der Konstruktion der meisten CR- und PBT-Systeme verwendet.

Abbildung 2.1 zeigt das geometrische Schema der schlitzartigen Kollimation. In Abb. 2.1 Ziffern zeigen an: 1 - die Strahlungsquelle; 2 - OK; 3 -

Fehler - Simulator; 4 - Schlitz - Kollimator; 5 - strahlungsempfindliches Volumen eines Szintillationsdetektors (SD); 6 - Photodetektor (AF). Der Schlitzkollimator ist durch die folgenden Parameter gekennzeichnet: die Abmessungen der Öffnung des Schlitzkollimators ; durch den Kollimator 1. Die Detektoröffnung in den CR- und PBT-Systemen ist viel kleiner als die OK-Abmessungen, daher ist es folgerichtig, der Bohrungsöffnung des Schlitzkollimators die folgende Begrenzung aufzuerlegen: $b / a \cdot 1$. Ohne Verlust der Allgemeinheit können wir annehmen, dass b .

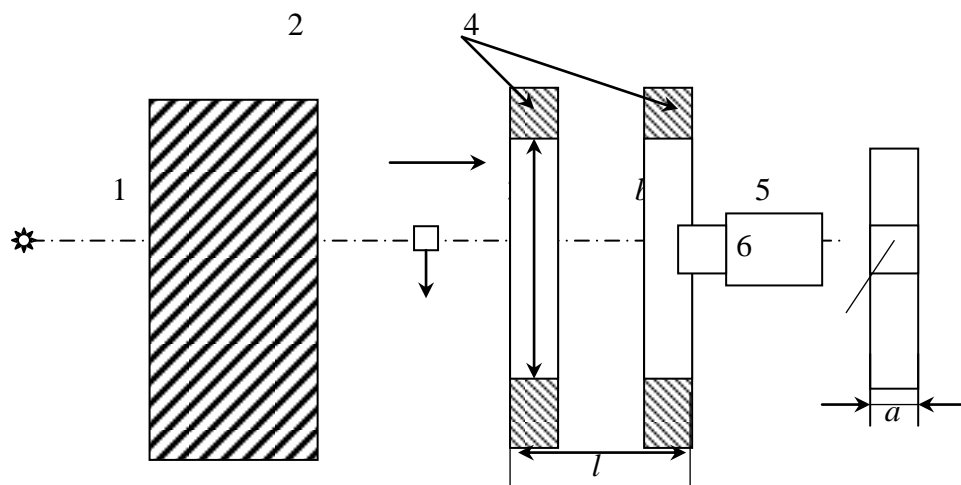


Abbildung 2.1 Geometrisches Schema der Spaltkollimation

Die Literatur enthält Daten zur Winkelverteilung von Streustrahlung für monoenergetische Strahlungsquellen [21]. Die Verallgemeinerung der Ausdrücke aus [22] zur Schätzung der Intensität der Streustrahlung kann durch die Formel beschrieben werden.

$$I = \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \left(2\pi \int_0^{\theta_1} \sin \theta \cdot \frac{dI_P(E)}{d\Omega} d\theta + 4 \int_{\theta_1}^{\pi/2} \arcsin\left(\frac{k}{\operatorname{tg}\theta}\right) \cdot \sin \theta \cdot \frac{dI_P(E)}{d\Omega} d\theta \right) dE, \quad (2.1)$$

wo $dI_P(E)/d\Omega$ – sind Beschreibungen von Winkelverteilungen von Streustrahlung für monoenergetische Strahlung mit Energie E hinter der Barriere [23]; $k=a/(2l)$; $\theta_1=\operatorname{arctg}(k)$.

Beachten Sie, dass bei Kollimatoren, die aus zwei Blenden bestehen,

die Strahlung von den Wänden des Kollimators vernachlässigt werden kann.

Für eine isotrope Punktquelle lautet die Formel zur Berechnung der Winkelverteilung wie folgt [24]:

$$\frac{dI_P^{T.H.}(E)}{d\Omega} = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i^{T.H.}(E) \exp(-\theta/\theta_i^{T.H.}(E)) / \sin \theta, \quad (2.2)$$

wo $n=2$, bei $E < 2,75$ MeV, $n=3$, bei $E > 2,75$ MeV, ist E die Energie von Photonen der Strahlung, die auf die Barriere einfällt; - Energieabhängigkeit von Normalisierungsfaktoren; - Energieabhängigkeit von charakteristischen Winkeln.

Für eine flache monodirektionale Quelle hat die entsprechende Formel bei normalem Einfall von Strahlung auf die Barriere die Form

$$\frac{dI_P^{H.M.}(E)}{d\Omega} = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i^{H.M.}(E) \exp(-\theta/\theta_i^{H.M.}(E)). \quad (2.3)$$

Für einen großen Bereich von Winkeln sind alle Terme in der Summe (2.3) außer dem ersten klein, so dass man zu der in der Literatur [25] bekannten exponentiellen Abhängigkeit übergehen kann

$$\frac{dI_P^{H.M.}(E)}{d\Omega} = C^{H.M.}(E) \exp(-\theta/\theta_0(E)).$$

Der Koeffizient des Energiekoeffizienten der Akkumulation von $B_3(E)$ ist wie folgt

$$2\pi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \frac{dI_P^{H.M.}(E)}{d\Omega} d\theta = B_3(E) - 1.$$

Die endgültige Formel für die Berechnung hat die

$$\text{Form } C^{H.M.}(E) = \frac{(B_3(E) - 1)(1 + \theta_0^2(E))}{2\pi\theta_0(E)(\theta_0(E) - \exp(-\pi/2\theta_0(E)))}.$$

Die Formel (2.1) kann als Summe zweier Integrale I_1 I_2 geschrieben werden. Das erste Integral ist wie folgt geschrieben:

$$I_1 = \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \frac{(B_3(E) - 1)(\theta_0(E) - \sin \theta_1(E) \exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) - \theta_0(E) \cos \theta_1(E) \exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right))}{\theta_0(E) - \exp(-\pi/2\theta_0(E))} dE$$

Für das zweite Integral I_2 ist die Ungleichung $k/\text{tg}(\theta) < 1$ in der Summe (2.1) erfüllt, daher hat die Approximation zur Berechnung der Größen I_2 die Form

$$I_2 = \frac{2k}{\pi} \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \frac{(B_{\text{D}} - 1) \left(\exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) + \theta_0(E) \exp\left(-\frac{\pi}{\theta_0(E)}\right) - \theta_0(E) \theta_1(E) \exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) \right)}{\theta_0(E) - \exp\left(-\frac{\pi}{2\theta_0(E)}\right)} dE.$$

Die erhaltenen Formeln erlauben es, einen abschließenden Ausdruck für die Schätzung des instrumentellen Energiespeicherkoeffizienten für einen Schlitzkollimator und eine flache monodirektionale Quelle zu bilden:

$$I = \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \frac{(B_{\text{D}}(E) - 1) \left(\theta_0(E) - (\theta_1(E) + \theta_0(E)) \exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) \right)}{\theta_0(E) - \exp(-\pi/2\theta_0(E))} dE + \frac{2k}{\pi} \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \frac{(B_{\text{D}} - 1) \left(\exp\left(-\frac{\theta_1(E)}{\theta_0(E)}\right) (1 - \theta_0(E) \theta_1(E)) + \theta_0(E) \exp\left(-\frac{\pi}{\theta_0(E)}\right) \right)}{\theta_0(E) - \exp\left(-\frac{\pi}{2\theta_0(E)}\right)} dE \quad (2.4)$$

Der Ausdruck (2.4) ist leicht anwendbar bei signifikanten Abständen zwischen Quellen und Strahlungsdetektoren zur Schätzung des Energieakkumulationskoeffizienten mit einem Schlitzkollimator der DRI- oder DTI-Linie und auch zur Wahl der Parameter der Schlitzkollimatoren der CR- und PBT-Systeme, basierend auf den Verbraucherparametern der zu entwickelnden Systeme.

Funktionen IT.I. (k) für kleine Abstände zwischen der Quelle und dem Strahlungsdetektor, dh für das geometrische Modell einer Punkt isotropen Strahlungsquelle, berechnet nach Formeln (2.1), (2.2) für verschiedene Energien und Materialien, sind in Abb. 2.2 angegeben. Die Werte von IT.I. (k) sind auf BE-1 normiert. Die Wirksamkeit der Verwendung von Schlitzkollimatoren nimmt mit abnehmender Energie der einfallenden Strahlung zu, was mit einer Zunahme der charakteristischen Winkel verbunden ist. Die Effizienz der Spaltkollimation nimmt signifikant ab, wenn die Ordnungszahl des Gegenstandsmaterials zunimmt. Diese

Art von Abhängigkeit ist auf das entsprechende Verhalten zurückzuführen. Normalisierte Abhängigkeiten $IT.I. (k)$ sind schwach abhängig von der Dicke des überwachten Objekts.

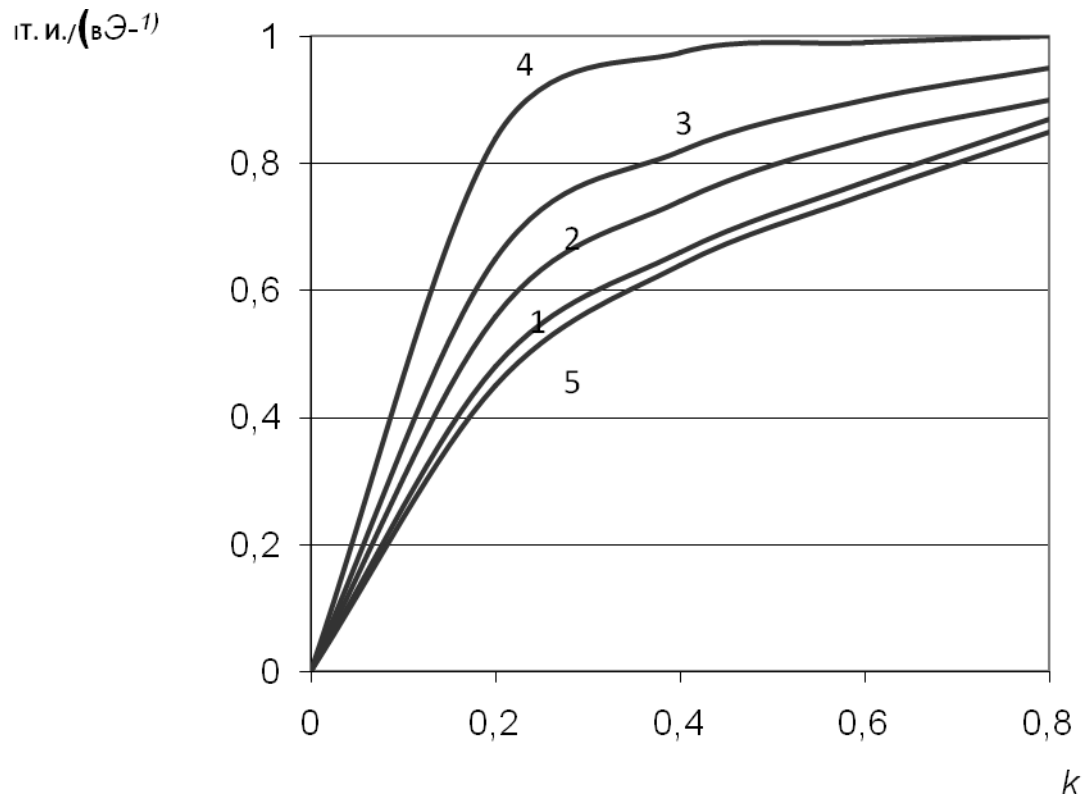


Abbildung 2.2: Abhängigkeit von $IT (k)$ für Gegenstände aus Stahl (1, 2, 3), Blei (4), Wasser (5) und maximale Photonenenergie E_{max} gleich 1 (1, 5), 3 (2), 15 MeV (3,4)

Unter Berücksichtigung des asymptotischen Verhaltens von $IT.I. (k)$ kann in der Praxis eine Approximation angewendet werden:

$$I^{T.H.}(k) \approx \frac{1}{1 + p/k}, \quad (2.5)$$

wobei p ein Parameter ist, dessen Wert von der maximalen Energie des IRI oder ITI und des Barrierenmaterials abhängt. Aus der Analyse von Berechnungen konnte festgestellt werden, dass der Wert des Parameters p proportional zum Effektivwert des charakteristischen Winkels ist. Der Koeffizient ist proportional zum Wert des charakteristischen Winkels. Der Fehler der Näherungsformel (2.5) für $k < 1/20$ beträgt nicht mehr als 5% und für $k > 1/20$ - etwa 12-15%.

Aus dem Vorstehenden folgt, dass der instrumentelle

Akkumulationskoeffizient für eine isotrope Punktquelle unter Verwendung des Ausdrucks geschätzt werden kann

$$B_{II}^{r.H.} \approx 1 + \frac{B_{\odot} - 1}{1 + 0,28\theta_{0\rightarrow\phi\phi}/k}. \quad (2.6)$$

Der Fehler im Ausdruck (2.6) für die Dicke der Barriere in $\text{dsp effH} \leq 3$ - nicht mehr als 7%; $\text{effH} > 3$ - von 10 bis 20%. Hier ist H die Dicke von OK in Zentimetern; Eff ist der effektive LCO von Röntgen- oder Bremsstrahlung für das Material OK.

2.2 Abschätzung der Effizienz der Spaltkollimation einer hochenergetischen Bremsstrahlungsquelle

Im vorhergehenden Abschnitt wurde ein Ansatz zur Schätzung des Energiespeicherkoeffizienten für die Schlitzkollimation einer Linie radiometrischer Detektoren betrachtet. Es wurde oben angemerkt, dass der Einfluss der Streuung auf die Qualität der Kontrolle in CR und PBT auch durch die Kollimation der Strahlungsquelle reduziert wird [26-27]. In Systemen CR und PBT, die für Messaufgaben bestimmt sind, werden die Lineale von optisch getrennten Detektoren verwendet. Für solche Systeme ist die Verwendung von Schlitzkollimatoren aus Quellen und Detektoren der Röntgen- und Bremsstrahlung wirksam [31]. Die Steuerung großer Objekte erfordert die Verwendung von Detektoren mit beträchtlicher Länge. In einer solchen Situation kann die Masse des Kollimators der Detektoranordnung signifikant sein. In einer Reihe von Fällen ist dies inakzeptabel, und daher gibt es manchmal keine Alternative zur Kollimation der Spaltkollimation der Hochenergie-Bremsstrahlungsquelle. Die strengsten Einschränkungen für die Kollimatormasse bei der Entwicklung von mobilen Systemen zur Kontrolle der Kontrolle von Containern, Fahrzeugen.

Der Energiekoeffizient der Strahlungsakkumulation, BE, charakterisiert den Beitrag der Streuung zu ganzzahligen analogen Signalen am Ausgang der einzelnen Linealdetektoren. In den letzten Jahren wurden CR- und RVT-Systeme verwendet, um Objekte mit einer Stahldicke im Bereich von 200 bis 300 cm zu

untersuchen, die zuvor für die Inspektion als ungeeignet angesehen wurden. Solche Objekte sind am charakteristischsten für die Inspektionskontrolle. Der Wert des Energiekoeffizienten der BE-Akkumulation hängt von einer großen Anzahl von Parametern der CR- und PBT-Systeme ab. Unter diesen Parametern ist zu beachten: das maximale Energie- und Energiespektrum von IRI und ITI; maximale Dicke und Form OK; effektive Ordnungszahl und Dichte des Materials OK; Winkelverteilung; Abstand von der Strahlungsquelle zum OK und von der Strahlungsquelle zum Detektorfeld; aus den Abmessungen und dem Material der Detektoren. Die Wirksamkeit der Quellenkollimatoren und der Detektoranordnung wird dadurch bestimmt, wie stark das effektive Streuvolumen des Kontrollobjekts begrenzt ist, d.h. Wie klein ist eine Quelle sekundärer Photonenstrahlung nach Volumen? Es wird oben angemerkt, dass Schlitzkollimatoren durch zwei Parameter charakterisiert werden können - Dicke l und Breite a . Der Parameter a wird die Öffnung der Kollimatorlücke genannt. Das Volumen der Sekundärstrahlungsquelle (Streuvolumen) wird durch den Schatten des Schlitzes auf der Frontfläche des OK bestimmt. Daher werden wir unter der Öffnung des Kollimators a die Breite des Bestrahlungsfeldes auf der Frontfläche des Überwachungsobjekts verstehen (siehe Abbildung 2.3). Wie oben kann die zweite Lückengröße bedingt als unendlich betrachtet werden, $b = \infty$.

Das wichtigste Merkmal ist auch die effektive Ordnungszahl und Dichte der Materialkollimatoren. Daraus folgt, dass die Gesamtzahl der Parameter, die bei der Auslegung der CR- und PBT-Systeme berücksichtigt werden müssen, sehr hoch ist. Unter dem ganzen Satz von Parametern ist es notwendig, das wichtigste zu identifizieren. Wir führen eine kurze Analyse der Aufgabe durch, große Objekte zu steuern, um die Dimensionalität des Problems zu reduzieren, dh die Grundparameter zu reduzieren. Analytierte Systeme CR und PBT, die zur Steuerung großer Objekte verwendet werden, müssen die Anforderung eines bestimmten Grades an Universalität für einen oder eine Gruppe negativer physikalischer Faktoren erfüllen.

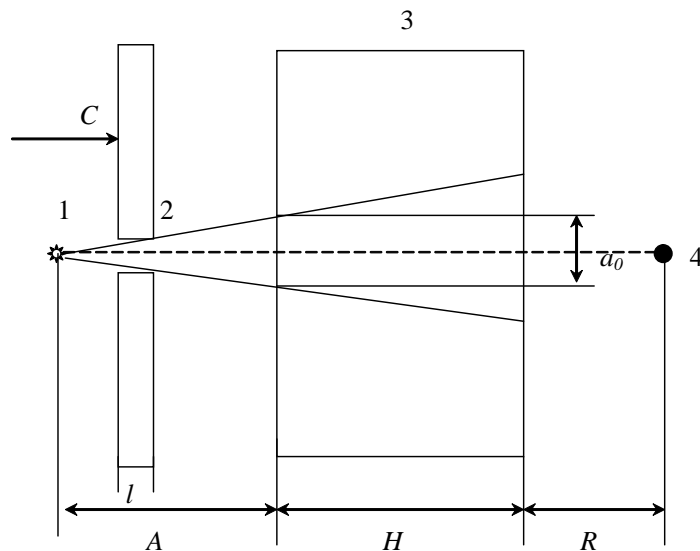


Abbildung 2.3 - Schema zur Begrenzung des Streuvolumens durch einen Spaltkollimator der Strahlungsquelle:

1 - Strahlungsquelle; 2 - Schlitz - Kollimator; 3 - Objekt der Kontrolle; 4 - Detektor

Die Forderung nach Universalität bedeutet, dass die zu entwickelnden Systeme effizient sein und ihre Funktionen erfüllen müssen, wenn sie Objekte oder deren Fragmente kontrollieren, die für einen bestimmten negativen physikalischen Faktor am schlechtesten geeignet sind. Zur Streuung eines solchen ungünstigen Objekts dient eine Steuerung, die aus einem Material mit erhöhten Streueigenschaften besteht. Zu den erwähnten Materialien gehören Substanzen mit einer kleinen effektiven Ordnungszahl [32-33], z. B. Zeff mit 6 bis 14 Ordnungszahlen. Daher folgt die Zulässigkeit von Berechnungen und experimentellen Untersuchungen für OK aus einem Material mit $Z_{eff} = 6$. Die zweite Annahme bezieht sich auf die Form des OK. Berechnungen und

Experimente können für eine planparallele Barriere der Dicke H durchgeführt werden. Die zweite Annahme ist gerechtfertigt, da der Energiespeicherkoeffizient für eine begrenzte Barriere immer kleiner ist als der Energiespeicherkoeffizient für eine unendliche Barriere. Die dritte Annahme ist mit dem DRI und DTI verbunden, wir betrachten die Detektoren als Vollabsorptionsdetektoren. Die vierte Annahme betrifft eine Strahlungsquelle, sei IRI oder ITI eine monodirektionale Quelle mit einem durch die Kramers-Formel ($E_{\max} < 1 \text{ MeV}$) oder die Schiff-Formel ($E_{\max} > 1 \text{ MeV}$) beschriebenen Energiespektrum. Die Annahme der Monodirektivität beruht auf der Tatsache, dass die Aperturgröße des Detektors in der Praxis viel kleiner ist als die Brennweite $F = A + H + R$. Beachten Sie, dass der Massenschwächungskoeffizient (MCE) für hohe Photonenenergien schwach von der effektiven Atomladungszahl abhängt, daher ist es sinnvoll, die Dicke (Massendicke) des OC in g / cm^2 zu messen. Aus dem Vorhergehenden folgt, dass die Aufgabe der Schätzung des Energiespeicherkoeffizienten für den Schlitzkollimator des ITI in der ersten Stufe darin besteht, die Abhängigkeit von BE von drei Parametern zu untersuchen: die maximale Bremsstrahlungsenergie ist E_{\max} ; Dicke der Barriere H aus einem Material mit $Z_{\text{eff}} = 6$; Die Breite der Öffnung des Schlitzdetektorkollimators ist a .

Zur Durchführung der Berechnungsexperimente wurde das geometrische Diagramm der Transmission verwendet, das in Fig. 1 gezeigt ist. Um den Energiekoeffizienten der Strahlungsakkumulation abzuschätzen, wurde ein Algorithmus zum Übertragen von Röntgen- und Bremsstrahlung durch die Monte-Carlo-Methode entwickelt und in FORTRAN implementiert. Um die Produktivität und Genauigkeit der Berechnungen zu verbessern, wurde eine Modifikation der Monte-Carlo-Methode mit einer lokalen Schätzung der Intensität der Streustrahlung verwendet [33]. Als Formel für den differentiellen Wirkungsquerschnitt der inkohärenten Streuung wurde der Klein-Nishina-Tamm-Wirkungsquerschnitt verwendet [33] und der Rayleigh-Wirkungsquerschnitt [33] für kohärente Streuung verwendet. Die Gesamtquerschnitte für die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie sind Bibliotheken aus der

Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie entlehnt [34].

Als Versuchsproben zur Überprüfung der Berechnungen wurden planparallele Barrieren aus Wasser mit einer Dicke von 1 bis 6 dsp gewählt. und hypothetische monoenergetische Strahlungsquellen mit einer Energie von 1 bis 10 MeV. Zur Abschätzung der Abhängigkeiten der BE von der maximalen Strahlungsenergie - E_{max} , der Barrierendicke - H aus einem Material mit $Z_{eff} = 6$, der Breite der Öffnung des Detektor-Kollimators - a , wurde eine Reihe von Computorexperimenten durchgeführt. Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen stimmen gut mit den in [32] angegebenen Daten überein, eine Diskrepanz von nicht mehr als 5% für die Anzahl der gespielten Historien von mehr als 1 Million.

Tabelle 2.1 zeigt die Ergebnisse von rechnerischen Experimenten zur Abschätzung der Abhängigkeit von BE (a) für verschiedene E_{max} von dem Bereich von 1 MeV bis 10 MeV, einer Barriere mit einer Massendicke von 80 g / cm^2 , einer effektiven Ordnungszahl von 6. Aus der Analyse der in Tabelle 2.1 erhaltenen Ergebnisse Daraus folgt, dass für die Öffnung einer Lücke von 2 cm und maximale Energien im Bereich von 2 bis 10 MeV der Beitrag der Streuung zum Integralfluss der hinter dem Objekt der Kontrolle registrierten Strahlung 5% nicht übersteigt.

Tabelle 2.1 - Abhängigkeit des Energiekoeffizienten der Akkumulation von BE von der Öffnung des Schlitzes a des Kollimators

$a/2, \text{ cm}$	$E_{max}, \text{ MeV}$					
	1	2	4	6	7,5	10
200	6,580	3,896	2,516	2,056	1,885	1,698
100	5,472	3,434	2,394	2,046	1,844	1,662
50	3,993	2,854	2,013	1,766	1,651	1,527
25	2,980	2,105	1,685	1,535	1,472	1,384
15	2,234	1,719	1,449	1,366	1,308	1,264
10	1,790	1,472	1,326	1,257	1,227	1,189
5	1,431	1,269	1,190	1,136	1,122	1,109
2	1,166	1,103	1,074	1,055	1,050	1,044
1	1,0853	1,051	1,033	1,027	1,024	1,022
0,5	1,041	1,024	1,017	1,014	1,012	1,011

Die Abhängigkeit von BE (a) steigt mit zunehmendem a bis zu einer bestimmten Grenze, und diese Grenze ist gleich dem Energiekoeffizienten der Strahlungsakkumulation in der Barrierengeometrie BB. Die untersuchte Abhängigkeit mit ausreichender Genauigkeit für die Praxis wird durch eine Approximationsabhängigkeit beschrieben:

$$B_{\ominus}(a) - 1 = (B_{\ominus} - 1) \cdot (1 - \exp(-c \cdot a)), \quad (2.7)$$

Hier ist c der Approximationsparameter, der von Emax abhängt.

Die Approximation (2.7) ist ziemlich genau. Die Genauigkeit der Approximation (2.7) über den gesamten Bereich und ändert sich Emax Kollimatorspalt Offenbarung nicht 2% nicht übersteigt.

Um die Anwendbarkeit der Ergebnisse von Computersimulationen in der praktischen Auswahl von Kollimatoren CR Systemparametern und PBT zu überprüfen, um die Angemessenheit des geometrischen Modells von „monodirectional Licht“ real Scan geometrichesskim Systemen zu rechtfertigen. Zu diesem Zweck muss das Verhältnis der Parameter der in Abb. 2.3. Es sei daran erinnert, dass ein gegebener Schaltungsparameter beinhaltet: Die Entfernung von der Vorderfläche zu ITI OK - A; lineare Dicke OK - H; Abstand von der Rückfläche zu dem OK DB - R. die Angemessenheit der berechneten geometrischen Modellberechnungen gemäß (a) für ITI maximale Energie Emax je Hierzu Berechnungen durchgeführt, um festzustellen, wurden durchgeführt = 7,5 MeV, genommen mit Berücksichtigung der Anisotropie der Winkelverteilung der Bremsstrahlungs .

Die Änderung des Abstands A im Bereich von 2 bis 20 m führt zu einer Änderung des BE um 20%. Prozent. Diese Änderung des Energiekoeffizienten der Strahlungsakkumulation verursacht eine Änderung des Strahlungscontrastes um nicht mehr als 3%. Für kleine Werte des Abstandes A ist die Verwendung von Spaltkollimation weniger effektiv als das geometrische Modell eines flachen monodirektionalen ITI. Der Wert von BE für einen Punkt anisotropen ITI mit Emax = 7,5 MeV für A = 3 m ist ungefähr gleich 1,05 für eine Lückenöffnung von

$a = 2 \text{ cm}$.

Es ist offensichtlich, dass der Wert des Energiekoeffizienten der Akkumulation durch den Abstand vom OK zum DTI-R beeinflusst wird, für ITI mit $E_{\text{max}} = 7,5 \text{ MeV}$. Wenn der Abstand R im Bereich von 10 cm bis 1 m variiert wird, unterscheidet sich der Wert von BE um nicht mehr als 8%.

Die durchgeführten Forschungen haben vorgeführt, dass es für die Einschätzung der Effektivität der Anwendung der Schlitzkollimation der Quelle der Bremsstrahlung genügt, das Problem für die Geometrie der flachen monodirektionalen Strahlungsquelle zu berücksichtigen.

In der Einleitung wird darauf hingewiesen, dass im letzten Jahrzehnt revolutionäre Veränderungen in der Produktion von DRI und DTI stattgefunden haben. Es betont bewusst den wesentlichen Unterschied zwischen Röntgendetektoren und hochenergetischen Bremsstrahlungsdetektoren. Die Hauptmerkmale von Mehrkanaldetektoren sind, in CR- und PBT-Systemen verwendet, die Kontrastempfindlichkeit und die räumliche Auflösung. Die räumliche Auflösung wird vor allem durch die transversalen Dimensionen des strahlungsempfindlichen Volumens bestimmt, die einem Punkt des digitalen radiographischen Bildes in der CR oder der Projektion in dem PBT entsprechen. Es ist logisch, ein solches Volumen von RNO als Elementarvolumen zu bezeichnen - aus dem Wort "Element". Die Verringerung der transversalen Dimensionen der elementaren RFD führt zu einer Erhöhung der räumlichen Auflösung, aber gleichzeitig wird eine Abnahme der Anzahl von Photonen beobachtet, die die frontale Oberfläche der elementaren RF kreuzen.

Es sollte auch angemerkt werden, dass das Erfordernis der vollständigen Absorption von Photonen für IRS, das im Prinzip durch IRI erreichbar ist, nicht realisierbar ist. Zur Zeit haben kommerzielle DTIs eine transversale Größe von RFO innerhalb von 1-2 mm. Auf dem Markt der wissenschaftlichen Ausrüstung gibt es auch DTIs mit RFO-Größen von 100 μm bis 200 μm , aber eine schwache Strahlung und oft eine leichte Isolierung der RF in solchen Detektoren erlaubt nicht die räumliche Auflösung, die der Endbenutzer der CR- und PBT-Systeme

benötigt. Es ist bekannt, dass eine Annäherung an das OK an die Strahlungsquelle unter Beibehaltung der Brennweite eine Erhöhung der räumlichen Auflösung ermöglicht. Diese Beobachtung gilt für IRI und ITI mit einer kleinen Dimension der strahlenden Oberfläche. Die Quellen von Röntgenstrahlung und Bremsstrahlung mit einer kleinen Brennfleckgröße zeichnen sich durch ihre hohen Kosten und ihre geringe Haltbarkeit aus.

Daraus folgt, dass der Wert von BE nicht die Wahl der Entfernung A bestimmt. Bedeutsamere Faktoren sind hier eine Zunahme der räumlichen Auflösung mit einer Abnahme der angezeigten Entfernung und eine mögliche Abnahme der Produktivität von CR- und PBT-Systemen, verursacht durch eine ausgeprägte Anisotropie der Strahlung.

Die in diesem Unterabschnitt präsentierten Ergebnisse erlauben mir, Empfehlungen für eine rationale Wahl der Parameter von Schlitzkollimatoren in CR- und PBT-Systemen zu entwickeln. Empfehlungen für die Auswahl der Parameter von Kollimatoren werden nachstehend gegeben, wobei die einschränkenden Anforderungen für das Niveau des Energiekoeffizienten der Akkumulation von BE berücksichtigt werden.

2.3 Experimentelle Bewertung des Energiekoeffizienten der Akkumulation von Bremsstrahlung

Die Möglichkeit einer experimentellen Bewertung des instrumentellen Akkumulationskoeffizienten beruht auf einer recht offensichtlichen Tatsache, die sich auf die Position des Defektsimulators in Bezug auf die Strahlungsquelle, OK, und den Strahlungsdetektor bezieht.

Befindet sich der Fehlersimulator auf der Seite der Strahlungsquelle, so ergibt sich für diese Variante der Strahlungscontrast k_X nach der Formel

$$k_X = \frac{\mu_{\text{ou}\phi\phi}(E_{\text{max}}, H)\Delta H}{B_{\text{э}}}, \quad (2.7)$$

Hier ist μ_{diff} die differentielle Röntgen- oder Bremsstrahlungs-Röntgenstrahlung für das Material OK; H ist die Dicke des Defektometers.

Befindet sich der Defektsimulator auf der Seite des Strahlungsdetektors und grenzt idealerweise an die Frontfläche des Detektors an, so liegt der Strahlungscontrast nahe bei dem Contrast für die ungestreute Strahlung k_{X0}

$$k_{X0} = \mu_{\text{diff}}(E_{\text{max}}, H)\Delta H. \quad (2.8)$$

Die Ausdrücke (2.7), (2.8) implizieren eine Formel für die experimentelle Bewertung des Energieakkumulationskoeffizienten.

$$B_{\text{Э}} \approx \frac{k_{X0}}{k_X}. \quad (2.9)$$

Wir stellen fest, dass dieser Ansatz zur Schätzung des Energiekoeffizienten der Strahlungsakkumulation für Systeme mit Kollimatoren von Quellen und (oder) Strahlungsdetektoren und ohne Kollimatoren geeignet ist.

Das Experiment wurde am Inspektions- und Inspektionskomplex (IDC) der Polytechnischen Universität Tomsk mit einer Strahlungsquelle - Betatron mit einer maximalen Energie von 9 MeV durchgeführt, die ein System der digitalen Hochenergie-Radiographie darstellt. In Abb. 2.3 zeigt das Bild des IDC TPU.



Abbildung 2.3 - Inspektions- und Inspektionskomplex mit dem Betatron IIB-9:
 1 - Box mit Betatron; 2 - Schlitzz - Kollimator; 3 - Detektorportal;
 4 - das horizontale Lineal der Detektoren; 5 - das vertikale Lineal der Detektoren;
 6 - Testobjekt; 7 - Kamera

Die wichtigsten technischen Merkmale des DCO TPU:

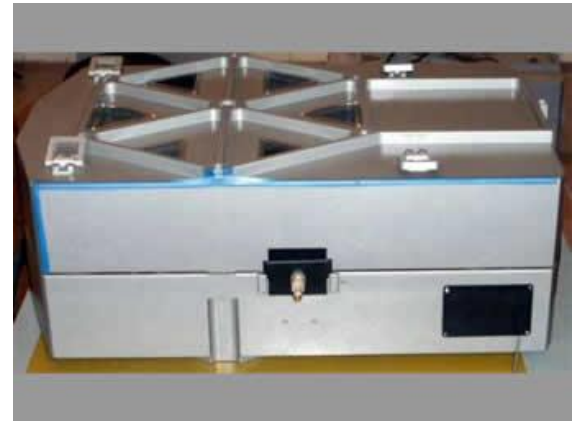
- Bereich der maximalen Energiebremsstrahlung 4-9 MeV;
- die Anzahl der Detektoren 864;
- Abstand von der Strahlungsquelle zu der Detektorleitung von 4,2 m;
- die Höhe des Objekts wird auf 2,5 m abgetastet wird;
- die Größe des Einkristall-Szintillator-Detektors $4 \times 35 \times 6$ mm³;
- räumliche Auflösung von 3 mm in der Mitte des abgetasteten Objekts.

Während der Experimente als Quelle hochenergetischer Bremsstrahlung verwendet Betatron-IIB 9/4 und IIB 7.5 / 4, die in Tomsk Polytechnic University hergestellt sind.

Abbildung 2.4 zeigt Betatronen 7,5 MeV und 10, die in Inspektion Inspektion Komplexe verwendet werden.



a



b

Abbildung 2.4 - Kleine Betatrons: a - IIB-7.5; b - CRAB (10 MeV)

Tabelle 2.2 zeigt die wichtigsten technischen Daten der in TPU hergestellten Betatron-Linie.

Die Bremsstrahlung wurde mit zwei Detektionssystemen aufgezeichnet - dem Standard-IDC-Detektionssystem TPU auf Basis von CdWO₄-Szintillatoren und einem mobilen mobilen Detektionssystem auf Basis von CsI-Szintillatoren. Mobiles, tragbares Erkennungssystem, hergestellt von PowerScan (China). Dieses System ist eine Kombination von zwei parallelen linearen Detektoren mit der eingebauten Software für die Kalibrierung durch "schwarz" und verringert den Beitrag des Nachglühens von Szintillatoren.

Tabelle 2.1 - Technische Eigenschaften kleiner Betatrons

№	Eigenschaften	Modelle					
		MIB-4	MIB-5	MIB - 6	MIB - 7,5	CRAB	MIB-9
1	Maximale Energie, MeV	4	4	6	7,5	10	4,5
2	Bremsstrahlungsdosisrate bei 1 m vom Ziel, cGy / min	1	3	3,0	5	20	2
3	Brennfleckgröße, mm ²	0,3× 2	,3× 2	0,3 × 3	0,3 × 3	0,5× 3	0,3 × 3
4	Frequenz der folgenden Beschleunigungszyklen, Hz	200	300	200	200	150	200
5	Leistungsaufnahme, kW	1,5	2,5	2,0	2,5	3,6	1,6
6	Maxim. Transluzente Dicke, mm:						
	Stahl	150	150	250	300	350	200
	Beton	600	800	100	1200	1500	—
7	Relative Röntgenempfindlichkeit,%	1	1	0,6	0,6	1	1

Die Massendicke der Fragmente des Testobjekts lag im Bereich von 20 bis 80 g / cm². Die Ergebnisse der experimentellen Schätzung des Energieakkumulationskoeffizienten nach Formel (2.9) und die Berechnung aus Formel (2.6) stimmen gut überein, die Divergenz beträgt nicht mehr als 10% für den gesamten Bereich der Änderungen der Massendicke des OK.

Somit ermöglicht die Berechnung dependences Instrumentierungskoeffizientenakkumulation an die monodirektionalen (2.4) und isotrop (2.6) der Strahlungsquellen ganz einfach eine Zahl des erwarteten Beitrag der Streustrahlung auf den Gesamtbeitrag des Auslaßschlitzes des Kollimators zu schätzen, oder Parameter des Kollimators zu wählen, auf der Grundlage des maximal zulässigen Verhältnisses von Ablagerungen von gestreut und ungestreute Strahlung in das Gesamtsignal. Daran erinnern, dass die Empfehlungen für die Auswahl der Parameter der Schlitzkollimatoren unten angegeben werden.

In der klassischen Radiographie digitale Präsenz Streufaktor kann den Kontrast von feinen Detailbildern und einen Rückgang der Wahrscheinlichkeit (Details) Erkennung reduzieren. Der untersuchte Faktor wird in der Röntgen-Computertomographie stärker gebrochen. In [36] wurde ein Unterkapitel zur Abschätzung des Fehlers aufgrund der Streuung im RVT in Betracht gezogen. Wir verwenden diesen Ansatz für die inverse Problemlösung - Erhalten Beschränkungen des Streubeitrag zu den integrierten Signalen von den Werten der Verbrauchsparameter mit Bezug auf eine Schätzung CSL Verteilung in RVT.

2.4 Bewertung des Fehlers bei der Abschätzung des LKO im PBT

Es ist bekannt, dass einer der Gründe für das Auftreten von Artefakten in der RVT Streuung ist. In der wissenschaftlichen Literatur werden konkrete Ergebnisse experimenteller Studien gezeigt [16-17], die den Einfluss der Streuung auf die Genauigkeit der Verteilung von LCOs über den Querschnitt im PBT darstellen. In [37] wird ein Ansatz vorgestellt, der auf der Rekonstruktion der Rotationskörperquerschnitte durch die Abel-Rücktransformation beruht. Dieser

Ansatz ermöglicht es, den Einfluss verschiedener physikalischer Faktoren getrennt und insgesamt auf die Qualität der Kontrolle zu untersuchen.

Wir verwenden den Ansatz von [39], um den Effekt der Streustrahlung auf die Genauigkeit der Reduktion des Querschnitts im PBT am Beispiel eines homogenen Rotationskörpers der Streustrahlung zu bewerten. Die Projektion in der engstrahligen Näherung der monoenergetischen Strahlung wird durch Ausdruck beschrieben

$$p(r) = 2 \int_r^R \frac{\mu(x)x}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx \quad , \quad (2.10)$$

wo R ist der Radius OK; $\mu(x)$ ist die radiale Verteilung des LCO.

Die Lösung von Gleichung (2.10) in Bezug auf LFC ist ähnlich der Lösung der Abel-Gleichung [40]

$$\mu(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{p'(x)}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx \quad . \quad (2.11)$$

Die Formel (2.11) ist die Grundlage für die nachfolgende Analyse. Seine Vielseitigkeit ermöglicht es, den Einfluss eines beliebigen physikalischen Faktors auf die Genauigkeit der Wiederherstellung der radialen Verteilung des LCO - $\mu(x)$ zu untersuchen. Dazu ist es notwendig, eine analytische oder experimentelle Beschreibung der Projektion $p(r)$ unter Berücksichtigung des analysierten Faktors zu erhalten. Die einzige Voraussetzung ist, dass die Funktion $p(r)$ ausreichend glatt ist.

Für Quellen gepulster Bremsstrahlung und Röntgenstrahlung ist es praktisch unmöglich, die Artefakte von Nicht-Monoenergetik und Streuung experimentell zu trennen. In diesem Fall gibt es keine Alternative zur numerischen Modellierung.

Betrachten Sie einen homogenen OC von beträchtlichem Durchmesser. Lassen Sie das Objekt mit Bremsstrahlung mit der maximalen Energie E_{max} und

dem Energiespektrum $f(E, E_{\max})$ bestrahlt werden. RFO Strahlungsdetektor aus einem Material mit einer effektiven Ordnungszahl Z_d und Dicke h_d . Mit ausreichender Genauigkeit für praktische Anwendungen kann die Projektion $p_{rs}(r)$ durch Ausdruck beschrieben werden

$$p_{rs}(r) = -\ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) B(E, Z, H) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H(r)} \varepsilon(E, Z_d, h_d) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, Z_d, h_d) dE}, \quad (2.12)$$

Hier ist $E_{ab}(E)$ die Energieabhängigkeit der absorbierten Energie des registrierten Photons; Detektionseffizienz des Detektors; B ist der Energiekoeffizient der Strahlungsakkumulation.

Die Projektion $p_{rs}(r)$ erlaubt, zwei negative Faktoren gleichzeitig zu berücksichtigen und die Mischung von Artefakten - nicht-monoenergetisch und streuend - zu bestimmen.

Die $p_r(r)$ -Projektion ohne Streuung ist für die rechnerische Isolation des Streuartefakts notwendig

$$p_r(r) = -\ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H(r)} \varepsilon(E, Z_d, h_d) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, Z_d, h_d) dE}. \quad (2.13)$$

Funktionsbeschreibung Projektions $p_r(r)$ (2,13) in Kombination mit dem Ausdruck (2.11) ergibt eine Schätzung der radialen Verteilung $\square r(r)$ mit Berücksichtigung nemonoenergetichnosti und $p_{rs}(r)$ (2,12) und die Invertierung der Abel-Transformation (2,11) - Schätzung der radialen Verteilung $\square rs(r)$ unter Berücksichtigung von Nicht-Monoenergetik und Streuung.

Приложение Б

(Справочное)

Программа моделирования методом Монте-Карло процесса переноса тормозного излучения на языке Fortran.

```
real ee(25),mu(25),mus(25),muk(25),mup(25),koef,be(20)
real u(25),uk(25),us(25),up(25),rr0(20),sr(20),sn(20)
integer ii,i0
real co,atom,ze,ne
common ne
data sr/20*0.0/,sn/20*0.0/
data ee/10.,15.,20.,30.,40.,50.,60.,80.,100.,150.,200.,300.,
*400.,500.,600.,800.,1000.,1500.,2000.,3000.,4000.,5000.,6000.,
*8000.,10000./
data u/45.3,15.6,8.62,5.07,4.13,3.72,3.5,3.21,3.01,2.69,2.45,
*2.13,1.9,1.73,1.6,1.41,1.27,1.03,.884,.709,.608,.54,.493,
*.429,.391/
data us/2.74,3.03,3.19,3.3,3.3,3.25,3.19,3.05,2.92,2.65,2.43,
*2.12,1.9,1.73,1.6,1.41,1.27,1.03,.878,.69,.577,.498,.441,.36,
*.307/
data up/17*0.0,.0016,.0064,.0184,.0298,.04,.049,.0642,.0766/
data uk/3.24,1.96,1.29,.672,.409,.274,.196,.114,.0745,
*.0339,.0193,.00853,.00481,.00308,.00215,.00121,9*0.0/
с программа для оценки эффективности щелевой коллимации источника
с моноэнергетического излучения
с h0 - толщина барьера, r0 - полуширина поля облучения, F0>h -
с фокусное расстояние, b0 - полудлина поля облучения
ii=171
koef=0.05014
roc=2.25
ro=2.25
atomc=11.28e22
atom=atomc*ro/roc
ze=6.
ne=ze*atom
do 111 j=1,25
mu(j)=u(j)*koef*ro
mus(j)=us(j)*koef*ro
muk(j)=uk(j)*koef*ro
mup(j)=up(j)*koef*ro
dm=mus(j)+mup(j)+muk(j)
if (dm.gt.mu(j)) mu(j)=dm
111 continue
type *, 'введите i0'
accept *,i0
type *, 'введите Emax'
accept *,em
type *, 'введите h0'
accept *,h0
с type *, 'введите расстояние от объекта контроля до детектора'
с accept *,hod
xd=0.
yd=0.
```

```

af=200.
zd=h0+50.
f0=af+zd
esr=2./3.*em
call int(esr,ee,mu,usr)
type *,usr/ro
t0=usr*h0
al0=e0/511.
b0=200.
do 555 ir0=1,20
rr0(ir0)=(6.-(ir0-1)*0.3)*af/f0
555 continue
afi=1.7267
ir0=1
r0=rr0(ir0)
rrb1=sqrt(af*af+b0*b0+r0*r0)
cob1=af/rrb1
il=0
do 10 i=1,i0
k=0
c w=1.
c=cob1+(1.-cob1)*ran(ii)
teta=acos(c)
w=afi*exp(-afi*teta)/(1.-exp(-afi*3.141592))
sit=sqrt(1.-c*c)
dpp=af/c
fi=6.283185307*ran(ii)
a=sit*cos(fi)
b=sit*sin(fi)
x0=dpp*a
y0=dpp*b
x00=x0
y00=y0
xx=ran(ii)
if (1.-xx.lt.0.) xx=ran(ii)
e0=em*(1.-sqrt(1.-xx))
call int(e0,ee,mu,ue0)
du=ue0*h0
do 301 m=1,20
if (abs(x00).le.rr0(m).and.abs(y00).le.rr0(m))
* sn(m)=sn(m)+e0*exp(-du)
301 continue
if (abs(x00).gt.rr0(1).or.abs(y00).gt.rr0(1)) go to 10
il=il+1
e=e0
al0=e0/511.
al=al0
z0=0.
2 continue
call int(e,ee,mu,ue)
call int(e,ee,muk,uek)
call int(e,ee,mus,ues)
call int(e,ee,mup,uep)
xx=ran(ii)
if(xx.le.0.) xx=ran(ii)
h=-alog(xx)/ue
c точка рассеяния
x=x0+h*a
y=y0+h*b
z=z0+h*c

```

```

        if(z.lt.0..or.z.gt.h0) go to 10
с локальный счет рассеянного излучения
    a1=x-x0
    a2=y-y0
    a3=z-z0
    a1d=xd-x
    a2d=yd-y
    a3d=zd-z
    rd2=a1d*a1d+a2d*a2d+a3d*a3d
    rd=sqrt(rd2)
    cotd=a3d/rd
    col=(a1*a1d+a2*a2d+a3*a3d)/rd/h
    e1=e/(1.+al*(1-col))
    call int(e1,ee,mu,uel)
    uh=(h0-z)/cotd
    du=uel*uh
    sknt=w*e1*fknt(al,col)/ue*exp(-du)/rd2*cotd
    du=ue*uh
    sk=w*e*uek/ue*exp(-du)/rd2/12.566*cotd
    sp=0.
    if (e.le.1022.) go to 88
    ep=511.
    call int(ep,ee,mu,up1)
    du=up1*uh
    sp=w*1022.*uep/ue*exp(-du)/rd2/12.5664*cotd
88    continue
    ras=sknt+sk+sp
    do 300 im=1,20
        if (abs(x00).le.rr0(im)) sr(im)=sr(im)+ras
300    continue
с        блок розыгрыша рассеяния
    u1=uep+ues+uek
    si=ran(ii)
    if (si.le.ues/u1) go to 7
    if (e.gt.1022..and.si.gt.ues/u1.and.si.le.(ues+uep)/u1) go to
6
    e=e
    al=e/511.
    call kog(co,ii)
    go to 9
6    continue
    e=511.
    w=2.*w
    co=1.-2.*ran(ii)
    al=1.
    go to 9
7    continue
    call kahn(co,al,ii)
    e1=e
    e=al*511.
    if (e/e1.gt.1.) type *,'kra='
9    continue
    call geom(a,b,c,co,ii)
    w=w*u1/ue
    if (w.le..001) go to 10
    k=k+1
    if (e.le.20.) go to 10
    x0=x
    y0=y
    z0=z

```



```

c          конец блока розыгрыша рассеяния
go to 2
10      continue
do 302 m=1,20
r0=rr0(m)
so=0.
do 200 j=1,i0
x=ran(ii)*r0
y=ran(ii)*r0
rt=sqrt(af*af+x*x+y*y)
cot=af/rt
so=so+cot
200    continue
so=so/i0*r0*r0*4.*f0*f0/af/af
sk0=so
sn(m)=sn(m)/sk0*afi
be(m)=1.+sr(m)/sn(m)
type *, 't0=', t0, 'r0=', r0*f0/af, 'b=', be(m)
302    continue
open (unit=2, file='bepin.dat', status='new')
do 557 ir0=1,20
write (2,556) rr0(ir0)*f0/af*10., be(ir0)-1.
556    format (2x, f10.2, 'mm', f10.4)
557    continue
close (unit=2)
stop
end
subroutine int(x,e,mu,um)
real e(25),mu(25)
i=1
if(x.le.e(1)) um=mu(1)
if(x.le.e(1)) go to 2
if(x.ge.e(25)) um=mu(25)
if(x.ge.e(25)) go to 2
1      i=i+1
if(x.le.e(i)) go to 3
go to 1
3 k=i-1
um=mu(k)+(x-e(k))/(e(i)-e(k))*(mu(i)-mu(k))
2      continue
return
end
subroutine geom(a,b,c,co,ii)
integer (4) ii
a1=a
b1=b
c1=c
hi=6.283184*ran(ii)
coc=(1.-co*co)*(1.-c1*c1)
if(coc.le.1.e-30) coc=1.e-30
s=sqrt(coc)
c=c1*co+s*cos(hi)
if (abs(c1).ne.1.) go to 2
if (abs(co).ne.1.) go to 4
si=0.
go to 5
4      coo=1.-co*co
if(coo.le.1.e-30) coo=1.e-30
si=sqrt(coo)
5 a=cos(hi)*si

```

```

    b=sin(hi)*si
    go to 3
2    continue
    s1=1./(1.-c1*c1)
    s2=co-c*c1
    sis=sin(hi)*s
    b=s1*(b1*s2+a1*sis)
    a=s1*(a1*s2-b1*sis)
3    continue
    return
end
subroutine kahn(co,al,ii)
integer (4) ii
1    continue
    r1=ran(ii)
    r2=ran(ii)
    r3=ran(ii)
    if(r1.le.(2.*al+1.)/(2.*al+9.)) go to 2
    y=(2.*al+1.)/(1.+2.*al*r2)
    u=1-(y-1.)/al
    if(r3.le.(u*u/2.+1./y)) go to 3
    go to 1
2    continue
    y=1.+2.*al*r2
    if(r3.le.(4.*(1./y-1./y/y))) go to 5
    go to 1
5    continue
    co=1.-2.*r2
    go to 4
3    continue
    co=1.-(y-1.)/al
4    al=al/y
    return
end
real function fknt(al,co)
real al,co,ne
common ne
re=7.94e-26
alc=al*(1-co)
alc1=1.+alc
s=(1.+co*co+alc*alc/alc1)/alc1/alc1
fknt=s*ne*re/2.
return
end
subroutine kog(co,ii)
1    continue
    x2=1.-2.*ran(ii)
    x1=1.+ran(ii)
    if(x1.gt.1.+x2*x2) go to 1
    co=x2
    return
end

```