

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

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки: приборостроение
Кафедра физических методов и приборов контроля качества

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Совершенствование метода дуальных энергий на основе выбора металлических фильтров

УДК 620.179.152:620.179.142.5.001

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БЗА	Кытманов Юрий Александрович		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Грахова Е.А.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФМПК	Суржиков А.П.	д.ф.-м.н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10; ОК-3,9; ПК-2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11,12, 13, 14, 15, 16,17, 18), Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК-7; ПК-8,9,10, 11, 12, 13-18) Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества	Требования ФГОС (ОК-9, ОПК-3; ПК-14, 15, 16). Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
Р4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности	Требования ФГОС (ОК-3,ОК-6, ОПК-2, 3,4, 5, 6, 7,8,9, ПК-1,2,9,14). Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе	Требования ФГОС (ОК-5, ОК-6 ОПК-2, 3,4,5,6; ПК-1,2,3,4). Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности;	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-6,8,14,17), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
	уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции	требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
	<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-17), Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, ОПК-2), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду	Требования ФГОС (ОК-2, 4, 8, 9,10; ОПК-9) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Институт неразрушающего контроля
 Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение
 Кафедра физических методов и приборов контроля качества

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

 (Подпись) (Дата) Суржиков А.П.
 (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
1Б3А	Кытманову Юрию Александровичу

Тема работы:

Совершенствование метода дуальных энергий на основе выбора металлических фильтров	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	10278/С от 30.11.2016
Срок сдачи студентом выполненной работы:	3.06.2017

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследований – методы дуальных энергий. Предмет исследований – предварительная фильтрация рентгеновского излучения в методе дуальных энергий. Цель исследований – совершенствование метода дуальных энергий на основе рационального выбора металлических фильтров.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Проведение расчётов и экспериментальных исследований и разработка на основе их результатов методики выбора толщины и материала металлических фильтров в цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии с функцией дуальных энергий.
Перечень графического материала	1. Схемы 2. Изображения 3. Графики
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	Грахова Елена Александровна
Социальная ответственность	Анищенко Юлия Владимировна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	12.09.16
---	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	к.т.н.		12.09.2017

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б3А	Кытманов Юрий Александрович		12.09.2017

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

Студенту:

Группа	ФИО
1Б3А	Кытманову Юрию Александровичу

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Бакалавриат	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>	-Проект выполняется в Российско-китайской научной лаборатории радиационного контроля и досмотра -Приблизительная сумма затрат на выполнение проекта составляет 35000000 -В реализации проекта задействованы 2 человека руководитель проекта, студент-дипломник
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	-Данная НИР новая, следовательно нормы и нормативы расходования ресурсов отсутствуют -Минимальный размер оплаты труда (на 2017 год) составляет 7500 руб
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	-Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данная НИР не подлежит налогообложению - Отчисления во внебюджетные фонды – 30 % от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения исследовательской работы</i>	-Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы - SWOT-анализ
<i>2. Планирование процесса управления НИР: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	-Планирование работ по научно-техническому исследованию;
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	- Оценка научно-технического уровня следования, - Оценка рисков

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НИР
 2. Матрица SWOT
- Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИР

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры менеджмента	Грахова Елена Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б3А	Кытманов Юрий Александрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б3А	Кытманову Юрию Александровичу

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Совершенствование метода дуальных энергий на основе выбора металлических фильтров. Областью применения является радиационный метод неразрушающего контроля (дефектоскопия).
--	---

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	Повышенный уровень электромагнитного и ионизирующего излучения Отклонение показателей микроклимата Поражение электрическим током
2. Экологическая безопасность:	Воздействие на литосферу. Вероятность радиационного заражения
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Разрушение здания. Пожары.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б3А	Кытманов Юрий Александрович		

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

Институт неразрушающего контроля
 Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение
 Уровень образования Бакалавриат
 Кафедра физических методов и приборов контроля качества
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	2.06.2017
--	-----------

Дата контроля	Название раздела / вид работы	Максимальный балл раздела
25.2.2017	Упрощенная реализация метода дуальных энергий	20
15.4.2017	Исследование влияния толщины предварительного фильтра на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера	20
29.4.2017	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	20
13.5.2017	Социальная ответственность	20
25.5.2017	Заключение	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	к.т.н.		11.12.2016

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФМПК	Суржиков А.П.	д.ф.-м.н., профессор		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 89 с., 6 рис., 24 табл., 48 источников.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, метод дуальных энергий, компьютерная томография, предварительная фильтрация рентгеновского излучения

Объектом исследования является метод дуальных энергий

Цель работы – расширить возможности цифровой радиографии и компьютерной томографии на основе комплексирования метода дуальных энергий с рациональным выбором толщин предварительных фильтров.

Проведено сравнение основных реализаций метода дуальных энергий: монохроматической; классической; псевдо-монохроматической.

Предложен критерий выбора толщин предварительных фильтров, учитывающий заданные погрешности оценок плотности, эффективного атомного номера и степень допустимого ухудшения производительности.

Теоретически исследовано влияние толщины предварительного фильтра на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера для однородных и многослойных цилиндрических объектов. Доказано хорошее различие материалов объектов контроля по плотности и эффективному атомному номеру.

Степень внедрения: результаты исследований использовались для выбора толщин фильтров для трубчатых объектов контроля.

Область применения: радиография; компьютерная томография.

Экономическая эффективность/значимость работы с повышением информативности методов радиографии и компьютерной томографии за счёт применения рациональной предварительной фильтрации рентгеновского излучения и улучшения точности определения распределений плотности и эффективного атомного номера.

В будущем планируется расширить область исследований и оценить возможность внедрения результатов в различных отраслях промышленности.

Оглавление

Введение	12
1 Обзор литературы	19
2 Упрощенная реализация метода дуальных энергий	22
2.1 Монохроматическая реализация метода дуальных энергий	22
2.2 Классическая реализация метода дуальных энергий	25
2.3 Псевдо-монохроматическая реализация метода дуальных энергий	26
2.4 Критерий выбора толщин фильтров	27
3 Исследование влияния толщины предварительного фильтра на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера	31
3.1 Однородные цилиндрические объекты	31
3.2 Многослойные цилиндрические объекты	36
3.3 Программа в системе MathCad для оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии	39
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	53
4.1 Технико-экономическое обоснование НИР	53
4.2 Планирование работ по научно-техническому исследованию	56
4.2.1 Определение трудоемкости этапов НИР	58
4.2.2 Техническая готовность темы	59
4.2.3 Построение графика работ	61
4.2.4 Смета затрат на разработку проекта	62
4.3 Оценка целесообразности исследования	66
4.3.1 Оценка научно-технического уровня следования	66
4.3.2 Оценка возможных рисков	67

5. Социальная ответственность	70
5.1 Производственная безопасность	70
5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	70
5.2. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	71
5.2.1 Воздействие неионизирующих излучений	71
5.2.2 Электрический ток	72
5.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны	73
5.2.4 Отклонение показателей микроклимата от нормальных	74
5.2.5 Повышенный уровень шумов	75
5.2.6 Повышенный уровень ионизирующего излучения	76
5.3 Экологическая безопасность	78
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	79
5.5 Разрушение зданий и/или сооружений	79
5.6 Пожарная безопасность	80
5.7 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	81
5.7.1 Организационные мероприятия	81
5.7.2 Организация рабочей зоны	82
Заключение	85
Список используемых источников	86

Введение

В настоящее время в различных отраслях науки, промышленности и строительства широко используются радиационные методы неразрушающих испытаний контроля и диагностики. Особую значимость приобрели различные реализации методов цифровой радиографии (ЦР) и компьютерной томографии. Методы ЦР и КТ базируются на одних и тех же физических закономерностях взаимодействия гамма- и рентгеновского излучения с веществом, так как единичная проекция в КТ представляет собой радиографическое изображение. Отличие методов КТ от методов ЦР заключается в объёмах исходной информации, методах её обработки и полноте полученной информации о структуре объекта контроля (ОК). В цифровой радиографии формируется цифровое теневое полутоновое радиографическое изображение с характерным наложением слоёв ОК друг на друга. Компьютерная томография в классической реализации позволяет оценить распределение линейного коэффициента ослабления (ЛКО) или массового коэффициента ослабления (МКО) излучения по объёму ОК. Усовершенствованные реализации КТ с надлежащим выбором энергии гамма- или рентгеновского излучения измеряют распределения плотности по объёму ОК.

Известно, что рентгеновское излучение имеет непрерывный спектр и МКО сложным образом зависит от энергии излучения и атомного номера ослабляющего вещества. Указанный факт приводит к смещению информативных характеристик поля рентгеновского излучения за объектом контроля при изменении толщины, плотности и эффективного атомного номера материала ОК. Для устранения таких смещений разработано несколько основных методов. К таким методам относятся: метод калибровок по ступенчатому тестовому объекту (ТО) с возрастанием толщины ступеней; метод предварительной фильтрации рентгеновского излучения; метод дуальных энергий (МДЭ); спектрометрический метод. Каждый из упомянутых методов обладает своими достоинствами и недостатками.

Метод калибровок по ступенчатому объекту отличается исключительной простотой, наглядностью и высокой производительностью, но его точность удовлетворяет потребителя лишь в случае контроля однородных по структуре и материалу объектов.

Метод предварительной фильтрации приводит к ужесточению пучка рентгеновского излучения. Трансформированный таким образом источник рентгеновского излучения становится псевдо-монохроматическим. Главным недостатком метода предварительной фильтрации рентгеновского излучения является снижение производительности.

В основу МДЭ положены физические закономерности взаимодействия гамма-излучения с веществом и важное базовое допущение: МКО различных эффектов взаимодействия гамма-излучения с веществом имеют свои собственные зависимости от энергии и эффективного атомного номера ослабляющего материала; МКО гамма-излучения представим в виде суммы МКО для двух конкурирующих процессов взаимодействия гамма-излучения с веществом. Конкурирующими эффектами в области средних значений рентгеновского излучения (150 – 350 кэВ) являются фотоэффект (полное поглощение фотонов) и эффект Комптона (некогерентное рассеяние фотонов). Для высокоэнергетического гамма-излучения (1,02 – 9 МэВ) характерны эффект Комптона и эффект рождения пар. В результате применения МДЭ формируется информация о двух параметрах, характеризующих ОК. Первый параметр совпадает с массовой толщиной ОК. Здесь под массовой толщиной ОК понимается произведение плотности материала ОК на его толщину. Вторым параметром равен произведению массовой толщины на некоторую функцию от эффективного атомного номера. Отметим, что существует диапазон энергий гамма-излучения, в котором преобладающим эффектом взаимодействия гамма-излучения с веществом является эффект Комптона, поэтому в таком диапазоне метод дуальных энергий не реализуется. Нижняя граница этого диапазона зависит от эффективного атомного номера ослабляющего вещества. Чем выше значение эффективного атомного номера, тем больше значение нижней

границы диапазона. Верхняя же граница указанного диапазона всегда выше 1,022 МэВ, что обусловлено энергетическим порогом эффекта рождения пар. Существуют несколько реализаций МДЭ, но все они приводят к дополнительным временным или материальным затратам. Безусловным достоинством МДЭ является получение дополнительной информации об объекте контроля.

В спектрометрических реализациях ЦР и КТ в качестве элементарного оцифрованного радиометрического сигнала выступает не единственное число, а распределение по энергии числа зарегистрированных фотонов, то есть вектор. В соответствии с вышесказанным спектрометрический метод также позволяет сделать оценку массовой толщины ОК и эффективного атомного номера его материала. Недостатки спектрометрического метода связаны с невозможностью использования высокоинтенсивных, тем более импульсных, источников рентгеновского излучения, что существенно ограничивает производительность контроля. Дополнительный недостаток обусловлен возрастанием объёма предварительной информации (в сотни и тысячи раз) и, соответственно, в необходимости специализированного алгоритмического и программного обеспечения. Немаловажным обстоятельством является высокая стоимость панельных и матричных спектрометрических детекторов.

Комплексирование МДЭ с компьютерной томографией позволяет осуществить оценку не только распределения плотности по объёму ОК, но и распределения эффективного атомного номера по объёму ОК. Повышение информативности методов ЦР и КТ, обусловленное применением МДЭ, существенно расширило их области применения. В последние годы экспоненциально увеличился объём исследований, связанный с применением методов ЦР и КТ с функцией МДЭ для контроля объектов, которые ранее считались непригодными к контролю. Методы МДЭ широко применяются в научных исследованиях, в медицине, в таможенном контроле, в обеспечении безопасности перевозок пассажиров.

Следует отметить вычислительную сложность классических реализаций МДЭ, позволяющих получать информацию о массовой толщине ОК и его эффективном атомном номере одновременно. Здесь под вычислительной сложностью понимается количество элементарных операций (сложение, вычитание, умножение, деление, обмен с памятью), необходимое для оценки информационных параметров. С этой точки зрения наиболее эффективной является монохроматическая реализация МДЭ. Одним из ограничений такой реализации является сложность, а иногда и невозможность, подбора соответствующих источников гамма-излучения. Второе ограничение связано со значительностью размеров излучающей части (фокусного пятна) источников на основе природных и техногенных радионуклидов. Третьим ограничением является необходимость соблюдения норм радиационной безопасности с источниками гамма-излучения.

Применение предварительной фильтрации рентгеновского излучения приводит к ужесточению рентгеновского излучения. В результате трансформированный поток рентгеновского излучения может быть ассоциирован с монохроматическим источником гамма-излучения. Такой источник рентгеновского излучения с достаточной степенью условности называется псевдо-монохроматическим. Очевидно, что при увеличении толщины предварительного фильтра наблюдаются два разнонаправленных момента – позитивный и негативный. Позитивным моментом является приближение трансформированного рентгеновского излучения к моно-линии (дельта функции). Негативный момент связан с уменьшением интенсивности рентгеновского излучения и, следовательно, с уменьшением производительности измерений. Методическая близость псевдо-монохроматической и монохроматической реализации МДЭ существенно упрощает понимание и анализ математических моделей систем ЦР и КТ, разработку алгоритмического обеспечения и программ для его реализации, анализ систематических погрешностей с установлением возможных причин их появления.

Из сказанного выше следует актуальность темы выпускной квалификационной работы и задач для реализации темы.

Объект исследований – методы дуальных энергий.

Предмет диссертационных исследований – предварительная фильтрация рентгеновского излучения в методе дуальных энергий.

Цель исследований – совершенствование метода дуальных энергий на основе рационального выбора металлических фильтров.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

– Провести краткий анализ литературы, посвящённой предварительной фильтрации рентгеновского излучения, в различных реализациях метода дуальных энергий в цифровой радиографии и компьютерной томографии.

– Сравнить классическую, монохроматическую и псевдо-монохроматические реализации метода дуальных энергий.

– Предложить обобщённый критерий выбора толщин предварительных фильтров для комплексного использования методов дуальных энергий и компьютерной томографии.

– Разработать алгоритм оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии с функцией дуальных энергий.

– Написать программу в системе для математических вычислений MathCad для оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии с функцией дуальных энергий применительно к объектам с осевой симметрией.

– Исследовать влияние толщины предварительного фильтра на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера однородных и многослойных цилиндрических объектов.

– Проиллюстрировать работу программы для некоторых типичных объектов с осевой симметрией.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, математического и имитационного моделирования, статистической обработки результатов экспериментальных исследований.

Научная новизна:

- Проведено сравнение классической, монохроматической и псевдо-монохроматической реализации метода дуальных энергий.
- Предложен обобщённый критерий выбора толщин предварительных фильтров для комплексного использования методов дуальных энергий и компьютерной томографии.
- Разработан алгоритм и программа для его реализации для оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии с функцией дуальных энергий применительно к объектам с осевой симметрией.
- Исследовано и проиллюстрировано влияние толщины предварительного фильтра на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера однородных и многослойных цилиндрических объектов.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в результате проведенных исследований критерий выбора параметров предварительного фильтра рентгеновского излучения и рекомендации по его использованию в совокупности с алгоритмом обработки информации позволяют повысить точность оценки радиальных распределений плотности и эффективного атомного номера объектов с осевой симметрией.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований реализованы в критерии выбора параметров предварительного фильтра рентгеновского излучения и в рекомендациях по его использованию, а также в алгоритме и реализующей его программе для оценки радиальных распределений плотности и эффективного атомного номера объектов с осевой симметрией.

Апробация работы. Основные положения выпускной квалификационной работы обсуждались на отчетах по НИР кафедры ФМПК в 2016 – 2017 годах.

На защиту выносятся:

– Результаты сравнения классической, монохроматической и псевдо-монохроматической реализаций метода дуальных энергий.

– Обобщённый критерий выбора толщин предварительных фильтров для комплексного использования методов дуальных энергий и компьютерной томографии.

– Алгоритм оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии с функцией дуальных энергий для объектов с осевой симметрией.

– Программу в системе для математических вычислений MathCad для оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии с функцией дуальных энергий применительно к объектам с осевой симметрией.

– Иллюстрационные примеры возможностей программы применительно к оценке распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии с функцией дуальных энергий для типичных объектов с осевой симметрией.

1 Обзор литературы

Появление в середине 60-х годов прошлого века компьютерной томографии расширило горизонты применения радиационных методов в науке, медицине, промышленности, транспорте и строительстве. Методом КТ удалось устранить наложение теней от различных слоёв, характерное для классической радиологии и различных реализаций цифровой радиологии. Компьютерная томография позволила оценить распределения некоторой условной характеристики ОК по объёму. Такой условной характеристикой стал эффективный линейный коэффициент ослабления излучения материалом. Эйфория от этого научного прорыва длилась недолго. Многие исследователи обнаружили, что срезы (слои) ОК, полученные методом КТ, существенно отличаются от реального среза объекта. Такие отклонения в КТ назвали артефактами. Многочисленные экспериментальные исследования позволили связать некоторые физические и технические факторы с характером и проявлением артефактом. Наиболее значимыми артефактами, с которыми на протяжении многих десятилетий продолжают бороться многочисленные исследователи, являются артефакты немоноэнергетичности и рассеяния [1–3]. Для компенсации артефактов немоноэнергетичности в настоящее время применяются два основных метода – компенсирующих фильтров и дуальных энергий. Метод компенсирующих фильтров для неоднородных по структуре объектов является сложным в практическом применении, так как требует изготовления фильтров сложного профиля [4]. Метод дуальных энергий является более универсальным, что заложено в его физической основе.

Метод дуальных энергий был изначально разработан в компьютерной томографии для компенсации ужесточения пучка рентгеновского излучения с увеличением толщины ослабляющего объекта [5–9]. Метод дуальных энергий (МДЭ) основан на представлении массового коэффициента ослабления (МКО) излучения суммой, в каждом члене которой выделяется две мультипликативных составляющих. Первая составляющая зависит только от

энергии и имеет одинаковое описание для всех ослабляющих материалов из области интереса. Второй сомножитель определяется параметрами объекта контроля (ОК) и его материала. К упомянутым параметрам относятся плотность, толщина объекта и эффективный атомный номер его материала. Именно такое представление МКО и определило второе направление применения МДЭ в цифровой радиографии (ЦР) и компьютерной томографии (КТ). Комплексование ЦР и МДЭ привело к разработке способов распознавания материалов ОК и их обособленных фрагментов [10–14]. Применительно к компьютерной томографии МДЭ позволяет не только уменьшить артефакты ужесточения пучка, но и оценить распределение плотности и эффективного атомного номера или параметров МДЭ по объёму контролируемого объекта [15–17]. Отметим, что для уменьшения влияния ужесточения пучка рентгеновского излучения и уменьшения (сужения) диапазона изменения радиометрических сигналов применяют предварительную физическую фильтрацию излучения [18–22] которая сводится введением в схему рентгеновского вычислительного томографа плоской металлической пластины. В случае необходимости фильтр может иметь сложный профиль. Наибольшее распространение в системах ЦР и КТ получили фильтры из алюминия и свинца. Это связано с высокой плотностью этих материалов и с достаточно высоким эффективным атомным номером. Дополнительным положительным моментом, определяющим выбор материала фильтра в пользу меди и свинца, является их небольшая стоимость.

Несмотря на недостатки источников на основе природных и техногенных радионуклидов, ряд из них обладает одним несомненным достоинством. Этим достоинством является то, что многие из радионуклидов излучают гамма-кванты одной энергии. В случае практического применения таких источников в комплексе с компьютерной томографией метод дуальных энергий ярко проявляет свою наиболее важную сторону – возможность получения дополнительной информации о структуре и материале объекта контроля и его структурных фрагментов. Следует отметить, что в этом случае

можно получить достаточно точную оценку распределений не абстрактных параметров, таких как дифференциальные МКО или ЛКО, а плотности и атомного номера или других характеристик материала.

Существуют монохроматические реализации МДЭ [23–26], в которых алгоритмы обработки информации отличаются исключительной простотой и высоким быстродействием. Именно на монохроматической реализации МДЭ основан быстродействующий и высокоточный способ нахождения параметров МДЭ [27]. В работе [28] как и выше подчёркнуто, что применение предварительной физической фильтрации рентгеновского излучения позволяет, в какой-то мере, ассоциировать трансформированный поток рентгеновского излучения с монохроматическим источником гамма-излучения. Такой трансформированный ужесточённый пучок рентгеновского излучения логично называют псевдо-монохроматическим [28]. Естественно предположить, что выбор толщины предварительного фильтра существенным образом зависит от решаемой задачи. В научной литературе не в полной мере обсуждены вопросы выбора толщины предварительного фильтра в псевдо-монохроматической реализации МДЭ для компьютерной томографии. В том числе, не сформулирован в замкнутой форме критерий выбора толщин. Метод дуальных энергий в псевдо-монохроматической реализации совместно с компьютерной томографией предположительно максимально упрощает понимание работы совместного алгоритма обработки информации, поэтому рассмотрим его подробнее.

2 Упрощенная реализация метода дуальных энергий

Для лучшего физического осмысления теоретических основ псевдо-монохроматической реализации МДЭ в ЦР и КТ приведём краткое описание монохроматической и классической реализаций МДЭ и обсудим возможные границы соприкосновения этих методов.

2.1 Монохроматическая реализация метода дуальных энергий

Воспользуемся одним из возможных вариантов описания связи измеренных радиометрических сигналов с параметрами МДЭ, аналогичным выражениям из [5–8]. Пусть ОК массовой толщиной ρH и эффективным атомным номером материала Z облучается потоками гамма-излучения с энергиями E_1 и E_2 . На вход алгоритма обработки информации в МДЭ поступают оцифрованные сигналы без объекта – $I_d(E_1,0,Z)$, $I_d(E_2,0,Z)$ и с объектом – $I_d(E_1,\rho H,Z)$, $I_d(E_2,\rho H,Z)$.

На первом этапе алгоритма обработки радиографических изображений осуществляется оценка радиационных толщин ОК – $Y(E_1,\rho H,Z)$, $Y(E_2,\rho H,Z)$. Радиационные толщины традиционно измеряются в длинах свободного пробега (д.с.п.). Соответствующие выражения для вычисления радиационных толщин имеют вид

$$\begin{aligned} Y(E_1,\rho H,Z) &= -\ln \frac{I_d(E_1,\rho H,Z)}{I_d(E_1,0,Z)} \\ Y(E_2,\rho H,Z) &= -\ln \frac{I_d(E_2,\rho H,Z)}{I_d(E_2,0,Z)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Принято считать, что для диапазона энергий гамма-излучения, не превышающих 1,022 МэВ, конкурирующими эффектами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются фотоэффект и эффект Комптона. Несмотря на достаточную условность такого допущения, связь радиационных

толщин $Y(E_1, \rho H, Z)$, $Y(E_2, \rho H, Z)$ параметрами МДЭ A и B описывается формулами

$$\begin{aligned} Y(E_1, \rho H, Z) &= m(E_1, Z) \rho H \approx A f_{photo}(E_1) + B f_{Compt}(E_1) \\ Y(E_2, \rho H, Z) &= m(E_2, Z) \rho H \approx A f_{photo}(E_2) + B f_{Compt}(E_2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

здесь $m(E_1, Z)$, $m(E_2, Z)$ – МКО гамма-излучения с энергиями E_1 и E_2 материалом с эффективным атомным номером Z ; $f_{photo}(E)$, $f_{Compt}(E)$ – энергетические зависимости, обусловленные фотоэффектом и эффектом Комптона. Отметим, что понятие эффективного атомного номера связано с диапазонами используемых энергий гамма-излучения, поэтому его значение для сложных веществ может отличаться для этих диапазонов энергий. Здесь под сложными веществами понимаются любые вещества, образованные двумя и более химическими элементами. В эту же категорию сложных веществ относятся материалы, представляющие смеси, растворы и сплавы.

Заметим, что в формулах (2.2) преднамеренно используется знак приближительного равенства \approx . Этот знак напоминает нам о том, что совокупность сценариев взаимодействия гамма-излучения с веществом не исчерпываются фотоэффектом (полное поглощение) и эффектом Комптона (некогерентное рассеяние). В области малых энергий гамма-излучения существенное влияние имеет эффект Релея, о чём свидетельствуют данные по взаимодействию гамма-излучения с веществом, приведённые в соответствующих базах [29, 30]. Из анализа указанных данных легко видеть, что упомянутое влияние тем выше, чем больше эффективный атомный номер ослабляющего материала.

Для анализируемой области гамма-излучения параметры МДЭ связаны с характеристиками ОК соотношениями

$$B = \rho H, \quad A = Z^\beta \rho H. \quad (2.3)$$

Теоретическое значение показателя степени β при значении эффективного атомного равно 4, на практике чаще всего используют значение $\beta=3,8$ [31]. Выше отмечено, что, строго говоря, значение параметра β определяется диапазоном используемых энергий и диапазоном эффективных

атомных номеров зоны потребительского интереса. Чем больше диапазон используемых энергий и чем шире диапазон эффективных атомных номеров материалов объектов, тем менее точной будет вторая формула в (2.3).

В научной литературе для экспериментальной аппроксимации энергетической зависимости $f_{photo}(E)$ используется степенная функция с показателем степени α , $\alpha = -2,8$ [32], $\alpha = -3$ и т.п. Вероятнее всего, указанные разночтения связаны с недоучётом замечания, высказанного выше относительно параметра β .

Энергетическую зависимость $f_{Compt}(E)$, как правило, описывают выражением, основанным на классической формуле Клейна-Нишины-Тамма. Указанная формула в ряде случаев не отличается высокой точностью, так как учитывает рассеяние фотонов исключительно на свободных электронах и не учитывает связанные электроны.

В конкретных условиях измерений фиксируются значения энергий E_1 и E_2 . Соответствующие измеренные значения радиационных толщин Y_1 и Y_2 связывает с параметрами A и B система двух линейных уравнений вида (2.2). Решение указанной системы имеет вид двухмерной линейной регрессии без соответствующих смещений

$$\begin{aligned} A &= Y_1 g_{22} + Y_2 g_{12} \\ B &= Y_1 g_{21} + Y_2 g_{11} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Коэффициенты регрессии g_{ij} , $i=1..2$, $j=1..2$ имеют строгое физическое толкование, вытекающее из выражений (2.2),

$$\begin{aligned} g_{11} &= -\frac{f_{photo}(E_1)}{r}, g_{12} = -\frac{f_{Compt}(E_1)}{r}, \\ g_{21} &= \frac{f_{photo}(E_2)}{r}, g_{22} = \frac{f_{Compt}(E_2)}{r} \quad . \quad (2.5) \\ r &= f_{photo}(E_1)f_{Compt}(E_2) - f_{photo}(E_2)f_{Compt}(E_1) \end{aligned}$$

В практическом отношении теоретические выражения (2.5) имеют смысл исключительно для предварительной оценки правильности выбора энергий E_1 и E_2 и построения детерминированных и статистических моделей систем ЦР и КТ с функцией МДЭ.

Следует отметить, что значение вспомогательного параметра r в выражениях (2.5) должно существенно отличаться от нуля. Близость же его к нулю свидетельствует либо о неправильном подборе энергий гамма-излучения, либо о принципиальной невозможности однозначного определения эффективного атомного номера материала ОК или его структурного фрагмента.

В экспериментальных приложениях монохроматической (моноэнергетической) реализации МДЭ коэффициенты двухмерной линейной регрессии g_{ij} , $i=1..2$, $j=1..2$ находятся на стадии калибровочных измерений. Фрагменты соответствующего тестового объекта должны перекрывать всю зону потребительского интереса по диапазонам изменения массовой толщины ρH и эффективного атомного номера Z .

2.2 Классическая реализация метода дуальных энергий

Этап формирования первичной информации в классической реализации МДЭ такой же, как и в монохроматической реализации, и сводится к вычислению по формулам (2.1) теоретических или экспериментальных значений радиационных толщин объекта – $Y(E_1, \rho H, Z)$, $Y(E_2, \rho H, Z)$. Различие состоит в использовании источников рентгеновского излучения с максимальными энергиями E_1 и E_2 . Система связи параметров МДЭ A и B в этом случае имеет вид [5, 27] более сложный, чем система (2.4),

$$Y(E_1, \rho H, Z) = -\ln \frac{\int_0^{E_1} F(E, E_1) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-Af_{photo}(E) - Bf_{Compt}(E)} dE}{\int_0^{E_1} F(E, E_1) E_{ab}(E) \varepsilon(E) dE}, \quad (2.6)$$

$$Y(E_2, \rho H, Z) = -\ln \frac{\int_0^{E_2} F(E, E_2) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-Af_{photo}(E) - Bf_{Compt}(E)} dE}{\int_0^{E_2} F(E, E_2) E_{ab}(E) \varepsilon(E) dE}$$

здесь $F(E, E_i)$, $i=1..2$ – числовые энергетические спектры рентгеновского излучения с максимальными энергиями E_i ; $E_{ab}(E)$ – среднее значение поглощённой энергии зарегистрированного фотона с энергией E ; $\varepsilon(E)$ – энергетическое распределение эффективности регистрации детектора.

В работе [27] проанализированы основные подходы к решению системы нелинейных интегрально-параметрических уравнений (2.5). Решение системы в классической постановке требует аналитического описания всех необходимых функций. Выше отмечено, что существуют определённые сложности в описании энергетических зависимостей $f_{photo}(E)$, $f_{Compt}(E)$. Известные подходы [33, 34] к оценке зависимостей $E_{ab}(E)$ с учётом утечки вторичных фотонов и электронов нуждаются в актуализации, что обусловлено, прежде всего, миниатюризацией чувствительных объёмов радиометрических детекторов. Существующие аппроксимации энергетических спектров рентгеновского излучения, например, [35, 36] не отличаются уровнем точности, необходимым для анализируемой задачи. Следует также отметить, что модели МДЭ, описываемые системами (2.2) и (2.6) могут быть достаточно далеки от реальности. Влияние различных физических и технических факторов, приводящих к смещению оценок параметров МДЭ, обсуждено в работах [37, 38].

Высокопроизводительные и высокоэффективные способы оценки параметров МДЭ A и B , предложенные в работе [27] требуют использования специальных сложных тестовых объектов.

Применение фильтров предварительной фильтрации позволяет считать трансформируемое рентгеновское излучение псевдо-монохроматическим. Ниже кратко изложим основы метода.

2.3 Псевдо-монохроматическая реализация метода дуальных энергий

Предварительная фильтрация рентгеновского излучения приводит к трансформации его исходного энергетического спектра. Если формирование

исходных цифровых радиографических изображений разнесено по времени, то целесообразно применение фильтров с различной толщиной h_1 и h_2 . Если разнесение по времени осуществить невозможно, то $h_1=h_2$. С учётом фильтрации излучения система (2.6) примет вид

$$Y(E_1, \rho H, Z) = -\ln \frac{\int_0^{E_1} F(E, E_1) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m_f(E) \rho_f h_1} e^{-A f_{photo}(E) - B f_{Compt}(E)} dE}{\int_0^{E_1} F(E, E_1) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m_f(E) \rho_f h_1} dE}, \quad (2.7)$$

$$Y(E_2, \rho H, Z) = -\ln \frac{\int_0^{E_2} F(E, E_2) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m_f(E) \rho_f h_2} e^{-A f_{photo}(E) - B f_{Compt}(E)} dE}{\int_0^{E_2} F(E, E_2) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m_f(E) \rho_f h_2} dE}$$

где $m_f(E)$ – энергетическая зависимость МКО для материала фильтра; ρ_f , h_f – плотность материала фильтра и его толщина.

Система (2.7) является исходной для разработки рекомендаций по выбору массовых толщин предварительных фильтров h_1 и h_2 . Для этого необходимо определиться с критерием выбора толщин фильтров.

2.4 Критерий выбора толщин фильтров

Массовая толщина предварительного фильтра $\rho_f h_f$ выбирается, исходя из упрощения реализации метода дуальных энергий. Упрощение сводится к гипотетической замене источника рентгеновского излучения с непрерывным спектром источником псевдо-монохроматического фотонного излучения. В результате такой замены алгоритм оценки параметров МДЭ основывается на системе (2.5). Главным вопросом является – насколько близок энергетический спектр трансформированного источника рентгеновского излучения к некоторому моноэнергетическому источнику гамма-излучения.

При сравнении различных реализаций МДЭ возможны два основных подхода [39] – по степени близости исходных и конечных информативных

параметров. Следует отметить, что параметры МДЭ для анализируемой задачи являются промежуточными. Конечными же параметрами КТ, дополненной методом дуальных энергий, являются распределения плотности ρ и эффективного атомного номера Z или функции от него по объему ОК. Очевидно, что на стадии предварительных расчётов применительно к выбору толщин предварительных фильтров наиболее легко реализуется подход, основанный на точности оценки параметров МДЭ – A и B . Для исследования трансформации смещений параметров A и B в смещения распределений плотности ρ и эффективного атомного номера Z удобно в качестве ОК использовать осесимметричный объект, например, [40, 41] а для обращения исходных проекций применять инверсию Абеля.

Приведём необходимые выражения, иллюстрирующие применение инверсии Абеля. Пусть объект контроля представляет собой цилиндр радиусом R , см. рисунок 2.1. Пусть имеется радиальное распределение некоторого параметра q . В качестве такого параметра может выступать МКО (для моноэнергетического источника излучения), параметры МДЭ – a и b .

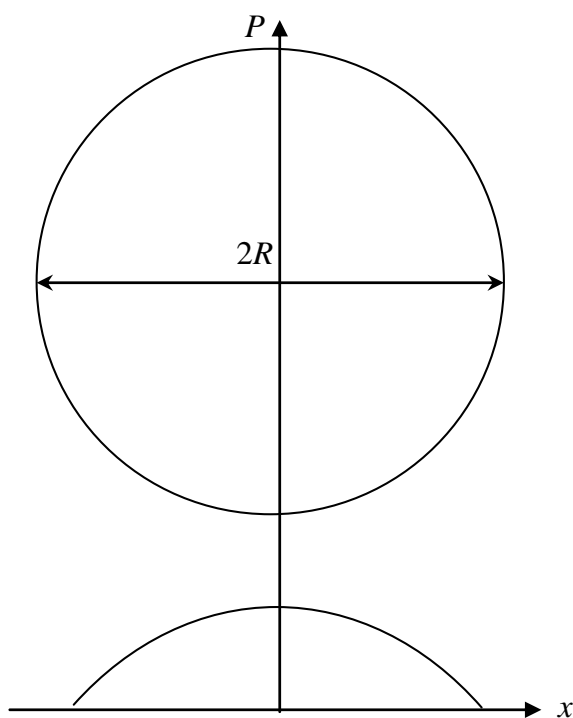


Рисунок 2.1 – Объект контроля и единичная радиографическая проекция

Пусть $P(x)$ – распределение проинтегрированного по лучу параметра q (проекция). Тогда связь радиального распределения $q(r)$ и проекции $P(x)$ описывается выражением (инверсия Абеля)

$$q(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{P'(x)}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx. \quad (2.8)$$

На вход алгоритма реконструкции поступают проекции $A(x)$ и $B(x)$, а на выходе формируются распределения $a(r)$ и $b(r)$. Из этих распределений в соответствии с выражениями (2.3) выводятся оценки радиальных распределений плотности и эффективного атомного номера

$$\rho(r) = b(r), \quad Z(r) = \beta \sqrt{\frac{a(r)}{b(r)}}. \quad (2.9)$$

Выражения (2.8), (2.9) выведены для малых размеров апертуры детектора. На практике при оценке радиального распределения плотности распределение $b(r)$ умножают на необходимый коэффициент.

Совокупности выражений (2.1)–(2.9) достаточно для исследования влияния толщины предварительного фильтра на оценки распределений плотности и эффективного атомного номера для псевдо-монохроматической реализации МДЭ.

В качестве основного критерия выбора толщин предварительных фильтров может быть выбран подход, основанный на заданных максимальных отклонениях конечных параметров. Пусть $\Delta\rho$ и ΔZ – заданные потребителем максимальные значения систематических погрешностей оценки распределений плотности и эффективного атомного номера. Тогда обобщённый критерий выбора толщин предварительных фильтров $h_1=1$ и h_2 в формализованном виде описывается системой неравенств

$$|\rho(r, h_1, h_2) - \rho_t(r)| \leq \Delta\rho; \quad |Z(r, h_1, h_2) - Z_t(r)| \leq \Delta Z; \quad (\rho_t, Z_t) \in V, \quad (2.10)$$

здесь $\rho_t(r)$ и $Z_t(r)$ – истинные распределения плотности и эффективного атомного номера; V – дискретное или непрерывное множество, определяемое

интервалами изменения массовых толщин объектов контроля и эффективных атомных номеров.

Предварительная фильтрация рентгеновского излучения приводит к снижению производительности контроля, поэтому дополнительным ограничением к критерию (2.10) является допустимость увеличения времени измерения в заданное количество раз k_{lim} . Так как производительность контроля объекта определяется его максимальной радиационной толщиной $\rho_t H_{max}$, то логично для вычисления коэффициента увеличения времени контроля k_g , вызванного предварительной фильтрацией излучения, воспользоваться выражением

$$k_g \approx \frac{1}{t_1 + t_2} \sum_{i=1}^2 \frac{t_i \int_0^{E_i} F(E, E_i) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m(E, Z) \rho_t H_{max}} dE}{\int_0^{E_i} F(E, E_i) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m(E, Z) \rho_t H_{max}} e^{-m_f(E) \rho_f h_2} dE}, \quad (2.11)$$

здесь t_i – время измерения для рентгеновского излучения с максимальной энергией E_i .

Дополнительное ограничение к системе неравенств (2.10) выглядит следующим образом

$$k_g(h_1, h_2) < k_{lim}. \quad (2.12)$$

Отметим, что совокупность неравенств (2.10) и (2.11) может не иметь решения. В этом случае потребитель разрабатываемого метода должен определиться со своими предпочтениями. Потребитель должен выбрать, чем и в какой мере он может пожертвовать – точностью оценки плотности, и (или) точностью оценки эффективного атомного номера, и (или) производительностью контроля.

Дополнительным критерием выбора является технологичность, например, формирование предварительных фильтров из пластин одинаковой толщины.

Вышесказанное является обобщённым критерием выбора толщин предварительных фильтров рентгеновского излучения в способе компьютерной томографии, дополненным псевдо-монохроматической реализацией МДЭ.

3 Исследование влияния толщины предварительного фильтра на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера

Исследуем влияние предварительной фильтрации на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера для двух классов объектов с осевой симметрией. К первому классу относятся однородные объекты, а ко второму – неоднородные.

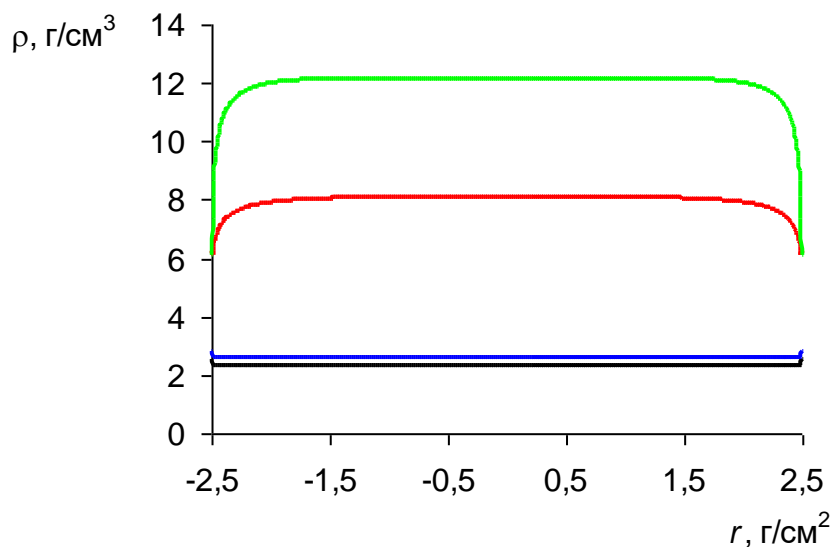
3.1 Однородные цилиндрические объекты

В качестве объектов для исследований были выбраны однородные цилиндрические объекты из углерода с плотностью $2,26 \text{ г/см}^3$, алюминия с плотностью $2,7 \text{ г/см}^3$ и стали с плотностью $7,86 \text{ г/см}^3$. Диаметр цилиндров в единицах массовой толщины – 5 г/см^2 . Максимальные энергии рентгеновского излучения $E_1=100 \text{ кэВ}$, $E_2=225 \text{ кэВ}$.

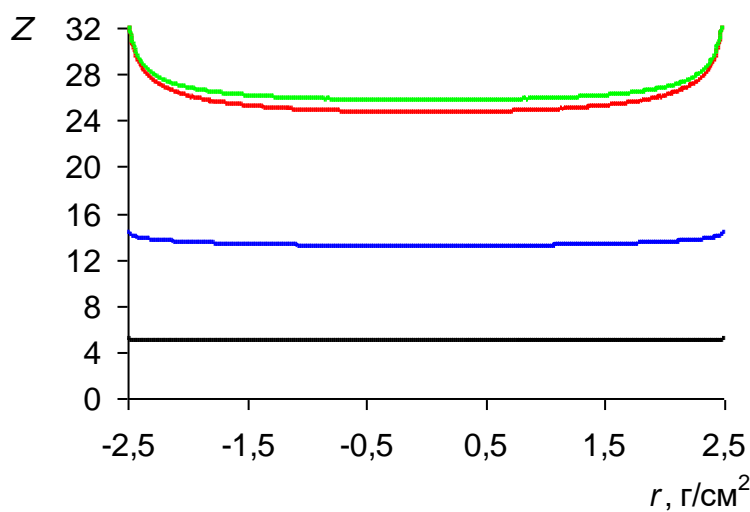
На рисунке 3.1 для иллюстрации приведены типовые радиальные зависимости $\rho(r)$ и $Z(r)$ для цилиндров из углерода, алюминия, стали и меди для толщин предварительных медных фильтров $h_1=1 \text{ мм}$ и $h_2=5 \text{ мм}$. Для этих толщин фильтров были получены методом наименьших квадратов значения коэффициентов линейной регрессии (2.4) и значения параметра аппроксимации β в представлении зависимости параметра МДЭ от Z : $g_{11}=9,3455$; $g_{12}=-15719$; $g_{21}=-1,7088$; $g_{22}=13359$; $\beta=2,705$.

Применение предварительных фильтров для рассматриваемого примера расчёта приведёт к снижению производительности контроля приблизительно в 2,8 раза. При этом существенно снижается влияние ужесточения пучка рентгеновского излучения, и возможно с достаточно высокой точностью оценить радиальные распределения плотности и эффективного атомного номера. Эффект, наблюдаемый на границе цилиндра, существенно зависит от эффективного атомного номера материала ОК. Для алюминия и углерода

смещения оценки плотности и эффективного атомного номера при выбранных толщинах фильтров незначимы.



a



b

Рисунок 3.1 – Радиальные зависимости *a* – $\rho(r)$ и *b* – $Z(r)$ для толщин предварительных медных фильтров $h_1=1$ мм и $h_2=5$ мм:

— углерод; — алюминий; — сталь; — медь

В качестве параметров, характеризующих эффективность применения предварительной фильтрации в МДЭ, могут быть использованы: диапазоны изменения плотности – (ρ_{min}, ρ_{max}) и эффективного атомного номера – (Z_{min}, Z_{max}) ;

коэффициент уменьшения производительности – k_g . В таблице 3.1 приведены значения указанных параметров эффективности применения предварительных фильтров из меди в псевдо-монохроматической реализации МДЭ в совокупности с компьютерной томографией.

Таблица 3.1 – Эффективность применения предварительных фильтров из меди в компьютерной томографии с привлечением метода дуальных энергий

h_1 , мм	h_2 , мм	Z	ρ_{min}	ρ_{max}	Z_{min}	Z_{max}	k_g
1	1	6	2,22	2,43	3,32	6,42	2,70
		13	2,52	3,05	11,87	13,68	1,75
		26	6,62	13,6	24,63	27,14	1,32
	2	6	2,29	2,49	5,35	5,45	2,49
		13	2,63	2,86	13,05	14,17	1,89
		26	7,52	8,23	25,55	31,26	1,40
	3	6	2,30	2,51	5,1	5,21	2,51
		13	2,60	2,82	13,11	14,33	2,06
		26	6,60	7,98	25,06	33,62	1,50
	5	6	2,31	2,51	5,01	5,15	3,66
		13	2,59	2,81	13,14	14,38	2,47
		26	6,09	8,11	24,71	34,86	2,11
	10	6	2,33	2,51	5,09	5,26	5,79
		13	2,60	2,81	13,11	14,34	4,03
		26	6,13	8,22	24,54	34,61	2,65
2	2	6	2,24	2,45	6,03	6,13	4,46
		13	2,67	2,97	12,98	13,27	2,68
		26	6,99	11,49	24,94	26,8	1,76
	3	6	2,26	2,47	5,58	5,66	4,61
		13	2,65	2,91	13,08	13,55	2,80
		26	7,42	9,53	25,96	27,1	1,83
	5	6	2,28	2,45	5,42	5,50	4,99
		13	2,65	2,89	13,09	13,66	3,12
		26	7,71	8,26	25,58	28,81	2,03
10	6	2,29	2,49	5,21	5,32	6,71	
	13	2,64	2,86	13,16	13,78	4,45	
	26	7,23	8,01	25,25	29,60	2,85	
3	3	6	2,25	2,46	6,04	6,15	6,82
		13	2,66	2,94	13,04	13,28	3,95
		26	7,20	10,6	25,19	26,61	2,36
	5	6	2,27	2,47	6,41	6,51	7,09
		13	2,65	2,90	13,04	13,42	4,18
		26	7,60	9,06	25,94	27,07	2,52
	10	6	2,28	2,84	5,12	5,19	8,39
		13	2,65	2,88	13,18	13,63	5,26
		26	7,64	8,23	25,56	28,09	3,22

Из анализа данных, приведённых в таблице 3.1, можно сделать несколько выводов для рассматриваемых максимальных энергий рентгеновского излучения.

– Увеличение толщины предварительного фильтра свыше 3 мм нецелесообразно для меньшей энергии, для большей энергии – свыше 10 мм. Нецелесообразность обусловлена значительным снижением производительности контроля.

– Наблюдается значительные систематические погрешности для оценок плотности и эффективного атомного номера для внешних областей объекта контроля и менее значительные – для внутренних областей.

Уровни систематических погрешностей могут быть значительно снижены с помощью калибровочных испытаний специальных тестовых объектов контроля. Тем не менее, установление причин указанных смещений необходимо для более корректного применения методики выбора толщин предварительных фильтров для конкретных объектов контроля.

Гипотеза. Наиболее вероятной причиной смещения оценок плотности и эффективного атомного номера является недостаточно адекватное описание энергетической зависимости массового коэффициента ослабления гамма-излучения формулами (2.3), (2.4).

Выше отмечено, что в выражении (2.4) не учитывается эффект когерентного рассеяния, который является значимым для рассматриваемых материалов в области энергий гамма-излучения меньших 150 кэВ.

Для подтверждения или опровержения сформулированной выше гипотезы была проведена серия расчётов по оценке распределения плотности и эффективного атомного номера для моноэнергетической реализации МДЭ с энергиями гамма-излучения $E_1=59,5$ кэВ, $E_2=142$ кэВ. Выбранные энергии приблизительно соответствуют эффективным энергиям рентгеновского излучения для примера расчёта. Выше было показано, что наиболее значимое смещение искомых оценок наблюдается на границе объектов из стали, поэтому для иллюстрации на рисунке 3.2 приведены радиальные зависимости

погрешностей $\delta\rho(r)$ и $b - \delta Z(r)$ для моноэнергетического гамма-излучения и псевдо-монохроматического рентгеновского излучения, сформированного фильтрами из меди толщинами $h_1=4$ мм и $h_2=10$ мм.

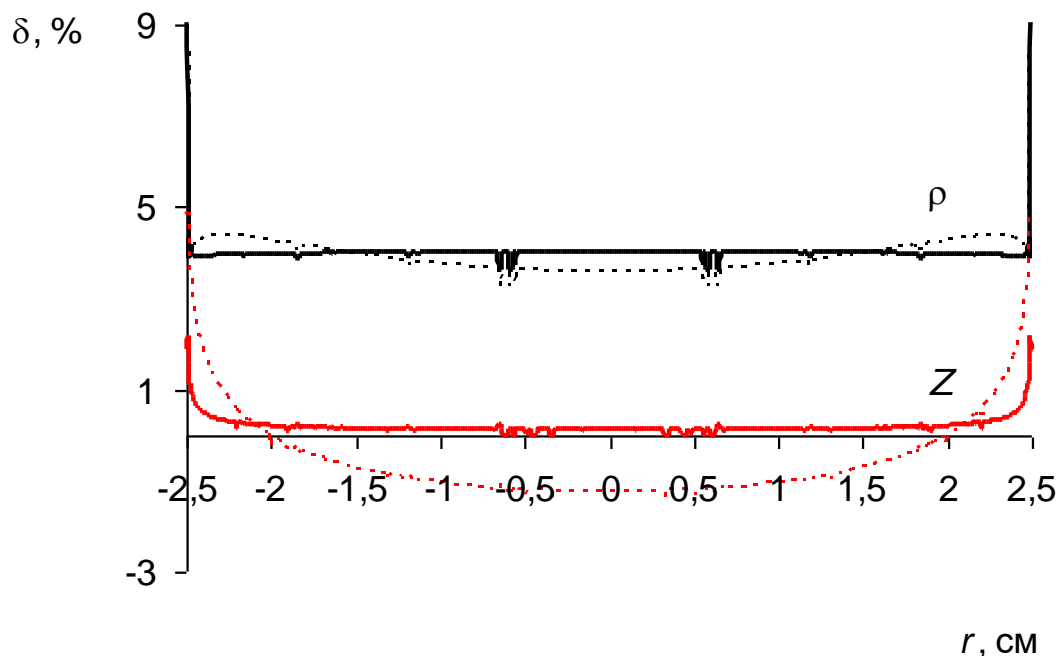


Рисунок 3.2 – Погрешности $\delta\rho(r)$ и $\delta Z(r)$ для стального цилиндра:

—, — — — моноэнергетическое гамма-излучение;
 - - -, - - - - псевдо-монохроматическое рентгеновское излучение

Анализ данных, приведённых на рисунке 3.2, позволяет подтвердить гипотезу, сформулированную выше. Систематические погрешности оценок плотности для моноэнергетического гамма-излучения и псевдо-монохроматического рентгеновского излучения для точек, принадлежащих внутренней части объекта, различаются не более чем на 0,6 %. Указанной погрешности вполне достаточно для основных практических приложений компьютерной томографии в комплексе с МДЭ. Для систематических погрешностей радиальных распределений эффективного атомного номера расхождения более значимы, но не превышают 1,2 % для центральной области цилиндра. Занижение оценки эффективного атомного номера составит не более 0,32 единицы, что также можно считать вполне удовлетворительным результатом. Следует также отметить большую выраженность завышения

оценок на границе для эффективного атомного номера по сравнению с плотностью.

Толщины предварительных фильтров выбираются с учётом изменения массовых толщин ОК и эффективных атомных номеров материалов на основе заданных потребителем погрешностей плотности и эффективного атомного номера.

Отметим, что если уровни погрешностей оценки ρ и Z не устраивают потребителя, то одним из возможных решений является применение тройных энергий [42]. В указанном методе ОК сканируется тремя пучками рентгеновского излучения со специальным образом подобранными максимальными энергиями. Стадия предварительной обработки исходных проекций сводится к набору параметров метода. В дополнение к описанным выше параметрам A и B вычисляется параметр C для когерентного рассеяния, который связан с параметрами объекта ρH и Z простым соотношением

$$C = Z\rho H . \quad (3.1)$$

Естественно ожидать, что представление массового коэффициента ослабления гамма-излучения в виде суммы соответствующих коэффициентов для фотоэффекта, некогерентного и когерентного рассеяния окажется существенно более точным, чем выражение (2.2). То же самое можно утверждать и о псевдо-монохроматической реализации метода тройных энергий на основе предварительной фильтрации излучения.

3.2 Многослойные цилиндрические объекты

Для подтверждения применимости анализируемого метода для более сложных объектов контроля был выбран гипотетический четырёхслойный цилиндрический объект. Радиус цилиндра $R_0=15$ мм. Цилиндр состоит из следующих слоёв: первый слой толщиной $0,2R_0$ из углерода плотностью $2,26$ г/см³; второй слой толщиной $0,2R_0$ из алюминия плотностью $2,7$ г/см³; третий слой толщиной $0,3R_0$ из меди плотностью $8,92$ г/см³; внутренний стержень

радиусом $0,3R_0$ из стали с плотностью $7,86 \text{ г/см}^3$. Максимальные энергии рентгеновского излучения $E_1=100 \text{ кэВ}$, $E_2=225 \text{ кэВ}$, соответствующие толщины медных фильтров $h_1=4 \text{ мм}$ и $h_2=10 \text{ мм}$.

На рисунке 3.3 приведены результаты оценки радиальных распределений $\rho(r)$ и $Z(r)$ для исследуемого объекта.

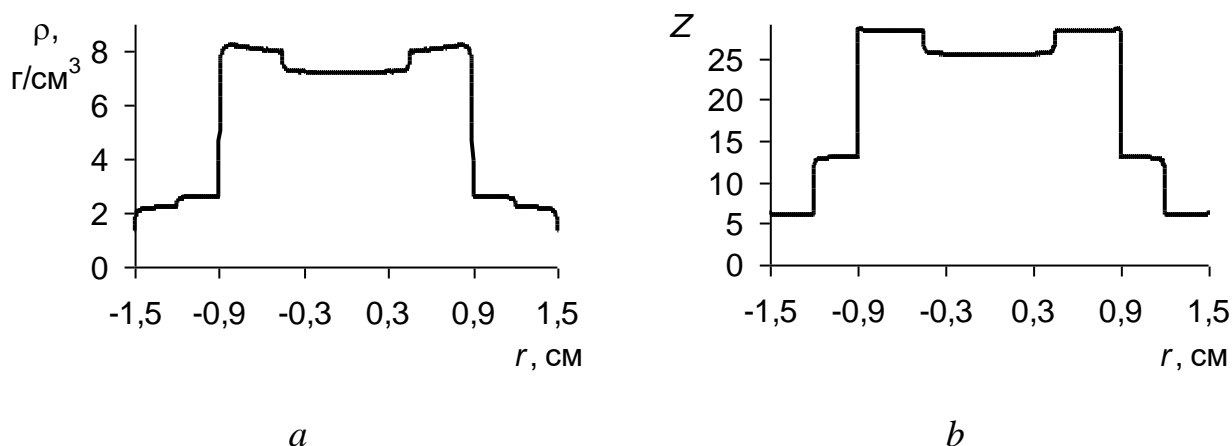


Рисунок 3.3 – Многослойный цилиндрический объект. Радиальные зависимости $a - \rho(r)$, $b - Z(r)$ для толщин предварительных медных фильтров $h_1=4 \text{ мм}$ и $h_2=10 \text{ мм}$

Из анализа данных, приведённых на рисунке 3.3, можно сделать вывод о удовлетворительном различии материалов фрагментов ОК по плотности и хорошем отличии материалов фрагментов по эффективному атомному номеру.

На рисунке 3.4 приведена иллюстрация качества идентификации материалов по эффективному атомному номеру. Максимальное смещение оценок Z не превысило по абсолютной величине 0,8 единиц эффективного атомного номера. Более значительные отклонения наблюдаются на границах разделов материалов.

Анализ результатов теоретических исследований и расчётов доказывает возможность точной оценки пространственного распределения эффективного атомного номера способом компьютерной томографии в комплексе с псевдомонохроматическим методом дуальных энергий. Выбор толщин фильтров предварительной фильтрации рентгеновского излучения основывается на компромиссе между увеличением точности оценок пространственных

распределений плотности и эффективного атомного номера и снижением производительности контроля по сравнению с классической реализацией метода дуальных энергий в компьютерной томографии.

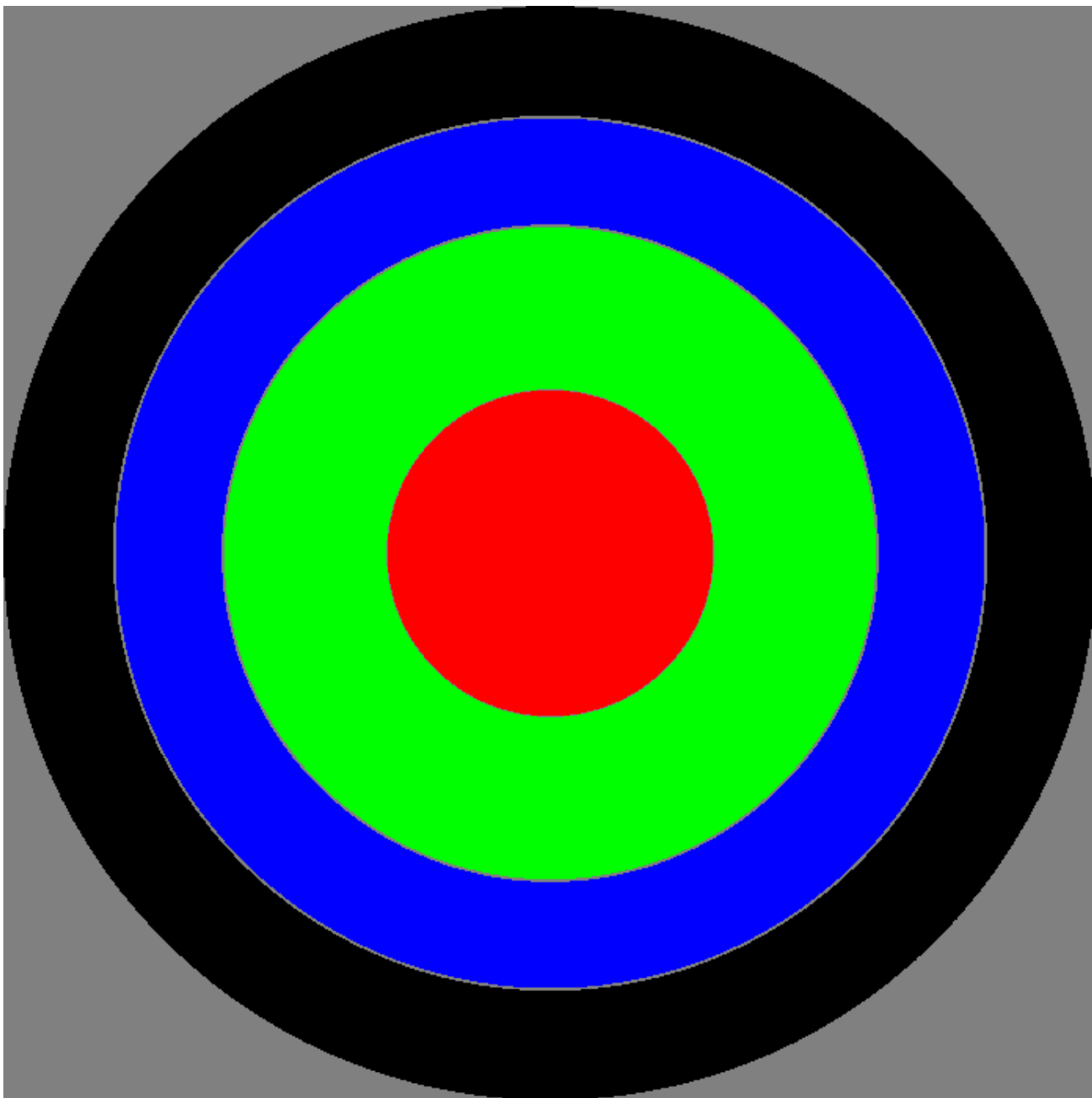


Рисунок 3.4 – Идентификация материалов многослойного цилиндрического объекта в компьютерной томографии псевдо-монохроматическим методом дуальных энергий:

■ – углерод; ■ – алюминий; ■ – сталь; ■ – медь

3.3 Программа в системе MathCad для оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии

Число Авогадро - $NA := 6.023 \cdot 10^{23}$

1. Исходные данные

1.1 Ввод данных по сцинтиллятору

Радиометрический детектор на основе $CdWO_4$

GR COHER COMPT PAIR PHOTO TOTAL EN.LOSS

$BCu := READPRN("Cu.txt")$ $BCd := READPRN("Cd.txt")$

$BW := READPRN("W.txt")$ $BO := READPRN("O.txt")$

молярные массы составл. сцинтиллятора

$MCd := 112.4$ $MW := 183.8$ $MO := 15.999$

характеристики материала фильтра

$MCu := 63.546$ $\rho_{Cu} := 8.93$

Материалы ОК - углерод C, алюминий Al, железо Fe и медь Cu

Молярные массы материалов

$MC := 12.011$ $MAI := 26.981$ $MFe := 55.84$ $MPb := 207.2$

плотность сцинтиллятора в $г/см^3$

$\rho_{sc} := 7.9$

толщина сцинтиллятора в см

$h_{sc} := 1$

эквивалентная толщина окна в рентгеновской трубке, в $г/см^2$

$h_b := 0.01$

макс. энергия рентгеновского излучения E_{max} варьируется от 100 до 450 кэВ

2. Ввод таблицы, сформированной из 127-групповой библиотеки

данных о взаимодействии гамма-излучения с веществом

Столбцы

0 номер группы

1 энергия в группе в эВ (нижний уровень или средняя)

2 и последующие (до предпоследней включительно) полные сечения взаимодействия в барн/атом

последний - средняя энергия зарегистрированного кванта

C := READPRN("aaa.txt")

таблица aaa.txt находится в директории программы

3. Преобразование введённой таблицы

GR 0 COHER 1 COMPT 2 PAIR 3 PHOTO 4 TOTAL 5 EN.LOSS 6

BCd W 0

j := 0..126 i := 0..9

Энергии переводится в кэВ, сечения и энергия зарегистрированного фотона

ранжируются по возрастанию энергии, сечения пересчитываются в МКО

$$n_j := C_{j,0} \quad E_j := \frac{C_{126-j,1}}{1000} \quad mal_j := \frac{C_{126-j,3} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MAI}$$

$$mc_j := \frac{C_{126-j,2} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MC} \quad mfe_j := \frac{C_{126-j,4} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MFe}$$

$$mpb_j := \frac{C_{126-j,5} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MPb} \quad mcd_j := \frac{C_{126-j,6} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MCd}$$

$$mw_j := \frac{C_{126-j,7} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MW} \quad mo_j := \frac{C_{126-j,8} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MO}$$

Средняя энергия зарегистрированного фотона в кэВ

$$EL_j := \frac{C_{126-j,9}}{1000} \quad i := 0..6$$

$$mCdcch_j := \frac{BCd_{126-j,1} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MCd} \quad mCdcom_j := \frac{BCd_{126-j,2} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MCd}$$

$$mCdpa_j := \frac{BCd_{126-j,3} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MCd} \quad mCdpho_j := \frac{BCd_{126-j,4} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MCd}$$

$$mCd_j := \frac{BCd_{126-j,5} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MCd} \quad mCu_j := \frac{BCu_{126-j,5} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MCu}$$

$$mWcoh_j := \frac{BW_{126-j,1} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MW} \quad mWcom_j := \frac{BW_{126-j,2} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MW}$$

$$mWpa_j := \frac{BW_{126-j,3} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MW} \quad mWpho_j := \frac{BW_{126-j,4} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MW}$$

$$mW_j := \frac{BW_{126-j,5} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MW} \quad mOcoh_j := \frac{BO_{126-j,1} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MO}$$

$$mOcom_j := \frac{BO_{126-j,2} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MO} \quad mOpa_j := \frac{BO_{126-j,3} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MO}$$

$$mOpho_j := \frac{BO_{126-j,4} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MO} \quad mO_j := \frac{BO_{126-j,5} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{MO}$$

Таблица ЛКО сцинтиллятора

$$\mu_{sc_j} := \frac{mCd_j \cdot MCd + mW_j \cdot MW + mO_j \cdot MO \cdot 4}{MCd + MW + MO \cdot 4} \cdot \rho_{sc}$$

$$\mu_{comsc_j} := \frac{mCdcom_j \cdot MCd + mWcom_j \cdot MW + mOcom_j \cdot MO \cdot 4}{MCd + MW + MO \cdot 4} \cdot \rho_{sc}$$

$$\mu_{pasc_j} := \frac{mCdpa_j \cdot MCd + mWpa_j \cdot MW + mOpa_j \cdot MO \cdot 4}{MCd + MW + MO \cdot 4} \cdot \rho_{sc}$$

$$\mu_{phosc_j} := \frac{mCdpho_j \cdot MCd + mWpho_j \cdot MW + mOpho_j \cdot MO \cdot 4}{MCd + MW + MO \cdot 4} \cdot \rho_{sc}$$

$$M_{sc} := MCd + MW + MO \cdot 4 \quad Z_{sc} := 48 + 74 + 4 \cdot 8$$

4. Нахождение коэффициентов сплайн-интерполяции для всех зависимостей

$$vc := cspline(E, mc) \quad val := cspline(E, mal) \quad vfe := cspline(E, mfe) \quad vpb := cspline(E, mpb)$$

$$vcad := cspline(E, EL) \quad vsc := cspline(E, \mu_{sc}) \quad vcomsc := cspline(E, \mu_{comsc})$$

$$vpasc := cspline(E, \mu_{pasc}) \quad vphosc := cspline(E, \mu_{phosc}) \quad vcu := cspline(E, mCu)$$

5. Введение функций - зависимостей МКО (mas) и ЛКО (mu) и средней энергии зарегистрированного фотона от энергии и т.п.

$$\text{masal}(x) := \text{interp}(\text{val}, E, \text{mal}, x) \quad \text{mascc}(x) := \text{interp}(\text{vc}, E, \text{mc}, x)$$

$$\text{masfe}(x) := \text{interp}(\text{vfe}, E, \text{mfe}, x) \quad \text{maspb}(x) := \text{interp}(\text{vpb}, E, \text{mpb}, x)$$

$$\text{musc}(x) := \text{interp}(\text{vsc}, E, \mu\text{sc}, x) \quad \text{ES}(x) := \text{interp}(\text{vcad}, E, \text{EL}, x)$$

$$\text{mucomsc}(x) := \text{interp}(\text{vcomsc}, E, \mu\text{comsc}, x) \quad \text{mupasc}(x) := \text{interp}(\text{vpasc}, E, \mu\text{pasc}, x)$$

$$\text{muphosc}(x) := \text{interp}(\text{vpphosc}, E, \mu\text{phosc}, x) \quad \text{mascu}(x) := \text{interp}(\text{vcu}, E, \text{mcu}, x)$$

эффективность регистрации - функция от энергии

$$\underline{\varepsilon}(x, \text{hsc}) := 1 - e^{-\text{hsc} \cdot \text{musc}(x)}$$

распределение интенсивности по энергии рентгеновского излучения

$$f(\text{emax}, x) := \frac{\text{emax}}{x} - 1$$

$$\text{Ecom}(\alpha) := \frac{-20 \cdot \alpha^4 + 102 \cdot \alpha^3 + 186 \cdot \alpha^2 + 102 \cdot \alpha + 18}{3 \cdot \alpha \cdot (1 + 2 \cdot \alpha)^3} - \frac{2 \cdot \alpha + 3 - \alpha^2}{\alpha^2} \cdot (\ln(1 + 2 \cdot \alpha))$$

$$r02 := 7.94 \cdot 10^{-26}$$

$$ne := NA \cdot \rho\text{sc} \cdot \frac{Z\text{sc}}{M\text{sc}}$$

$$t := 0.75 \quad b1 := 2.33 \quad b2 := 0.33$$

$$\text{Emin}(E) := E \cdot \frac{\text{muphosc}(E)}{\text{musc}(E)} + \frac{E - 1022}{\text{musc}(E)} \cdot \text{mupasc}(E) + \pi \cdot r02 \cdot ne \cdot 511 \cdot \frac{\text{Ecom}\left(\frac{E}{511}\right)}{\text{musc}(E)}$$

$$\text{Emax}(E, \text{hsc}) := \text{Emin}(E) + (E - \text{Emin}(E)) \cdot \left(1 - e^{-t \cdot \text{musc}(E) \cdot \text{hsc}}\right)$$

$$\underline{g}(E, \text{hsc}) := b1 \cdot \text{musc}(E) + \frac{b2}{\text{musc}(E) \cdot \text{hsc}}$$

$$\text{Eab}(E, \text{rsc}, \text{hsc}) := \text{Emin}(E) + (\text{Emax}(E, \text{hsc}) - \text{Emin}(E)) \cdot \left(1 - e^{-\underline{g}(E, \text{hsc}) \cdot \text{rsc}}\right)$$

Спектр поглощённой энергии

$$\underline{\Omega}(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) := f(\text{emax}, x) \cdot \frac{\text{Eab}(x, \text{rsc}, \text{hsc})}{x} \cdot \underline{\varepsilon}(x, \text{hsc}) \cdot e^{-\text{mascu}(x) \cdot \rho\text{cu} \cdot \text{hcu}}$$

$$\begin{aligned}
Y(\text{emax}, \text{rsc}, \text{hsc}, \rho H, \text{hcu}, Z) := & \left. -\ln \left(\frac{\int_5^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \cdot e^{-\text{mascc}(x) \cdot \rho H} dx}{\int_5^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) dx} \right) \right\} \text{if } Z = 6 \\
& \text{otherwise} \\
& \left. -\ln \left(\frac{\int_5^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \cdot e^{-\text{masal}(x) \cdot \rho H} dx}{\int_5^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) dx} \right) \right\} \text{if } Z = 13 \\
& \text{otherwise} \\
& \left. -\ln \left(\frac{\int_5^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \cdot e^{-\text{masfe}(x) \cdot \rho H} dx}{\int_5^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) dx} \right) \right\} \text{if } Z = 26 \\
& \text{otherwise} \\
& \left. -\ln \left(\frac{\int_5^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \cdot e^{-\text{mascu}(x) \cdot \rho H} dx}{\int_5^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) dx} \right) \right\} \text{if } Z = 29 \\
& \text{"none" otherwise}
\end{aligned}$$

$N := 250$ $\text{rsc} := 0.3$

$\text{hsc} := 0.3$

$e2 := 250$ $e1 := 100$

$ZZ := \begin{pmatrix} 6 \\ 13 \\ 26 \\ 29 \end{pmatrix}$

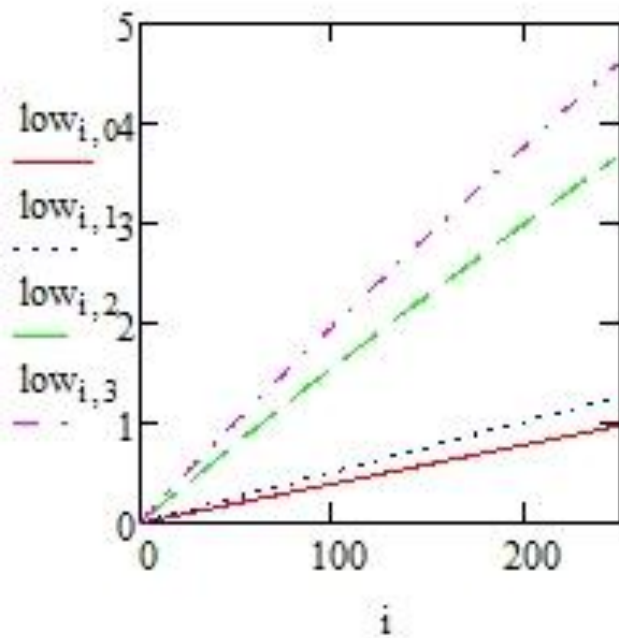
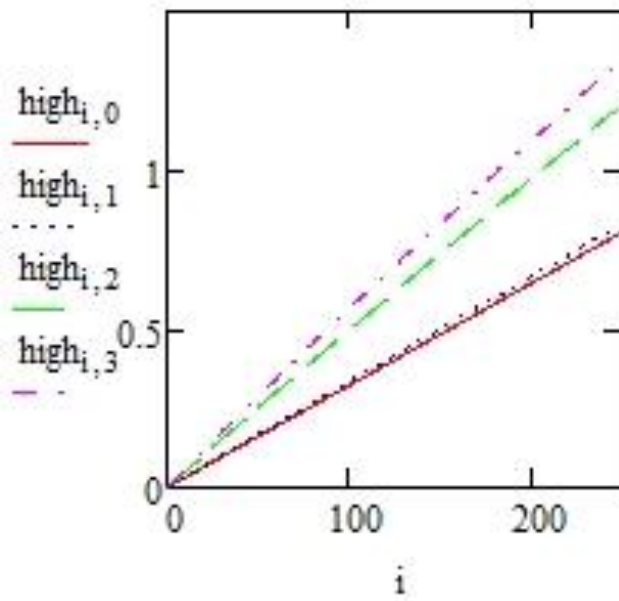
$RR := 3$ $i := 0..N$ $k := 0..3$

$\text{hfh} := 1.0$ $\text{hfl} := 0.4$

$X_i := \begin{cases} 0.0001 & \text{if } i = 0 \\ 2 \cdot RR \cdot \frac{i}{N} & \text{otherwise} \end{cases}$

$\text{high}_{i,k} := Y(e2, \text{rsc}, \text{hsc}, X_i, \text{hfh}, ZZ_k)$

$\text{low}_{i,k} := Y(e1, \text{rsc}, \text{hsc}, X_i, \text{hfl}, ZZ_k)$



$$FL(a_l, b_l, \beta) := \sum_{i=0}^N \sum_{k=0}^2 \left[\left[b_l + a_l \cdot (ZZ_k)^\beta \right] \cdot X_i - low_{i,k} \right]^2$$

$$FF(a_h, b_h, a_l, b_l, \beta) := \sum_{i=0}^N \sum_{k=0}^2 \left[\left[b_h + a_h \cdot (ZZ_k)^\beta \right] \cdot X_i - high_{i,k} \right]^2 + FL(a_l, b_l, \beta)$$

$$a_h := 0.1566$$

$$b_h := 0.00001475$$

$$\beta := 3.179$$

$a_1 := 0.2$

$b_1 := 0.2$

$R := \text{Minimize}(FF, ah, bh, al, bl, \beta)$

$ah := R_0$

$bh := R_1$

$\beta := R_4$

$al := R_2$

$bl := R_3$

$R := \text{Minimize}(FF, ah, bh, al, bl, \beta)$

$ah := R_0$

$bh := R_1$

$\beta := R_4$

$al := R_2$

$bl := R_3$

$$R = \begin{pmatrix} 3.15594083 \times 10^{-6} \\ 0.13214539 \\ 0.00002078 \\ 0.156481 \\ 3.07786347 \end{pmatrix}$$

$R := \text{Minimize}(FF, ah, bh, al, bl, \beta)$

$ah := R_0$

$bh := R_1$

$\beta := R_4$

$al := R_2$

$bl := R_3$

$$R = \begin{pmatrix} 3.15594083 \times 10^{-6} \\ 0.13214539 \\ 0.00002078 \\ 0.156481 \\ 3.07786347 \end{pmatrix}$$

$$\underline{ah} := R_0$$

$$\underline{bh} := R_1$$

$$\underline{al} := R_2$$

$$\underline{bl} := R_3$$

$$\underline{\beta} := R_4$$

$$FF(\underline{ah}, \underline{bh}, \underline{al}, \underline{bl}, \underline{\beta}) = 0.3897169$$

$$R0 := 1.5$$

$$R1 := 0.8 \cdot R0$$

$$R2 := 0.6 \cdot R0$$

$$R3 := 0.3 \cdot R0$$

$$N := 2000$$

$$i := 0..N$$

$$\Delta := \frac{2 \cdot R0}{N}$$

$$YY_i := -R0 + i \cdot \Delta$$

$$YY_0 := -R0 + 0.00001$$

$$YY_N := R0 - 0.00001$$

$$X_i := \begin{cases} 0.0001 & \text{if } 2 \cdot \sqrt{R0^2 - (YY_i)^2} \leq 0. \\ 2 \cdot \sqrt{R0^2 - (YY_i)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{fe} := 7.86$$

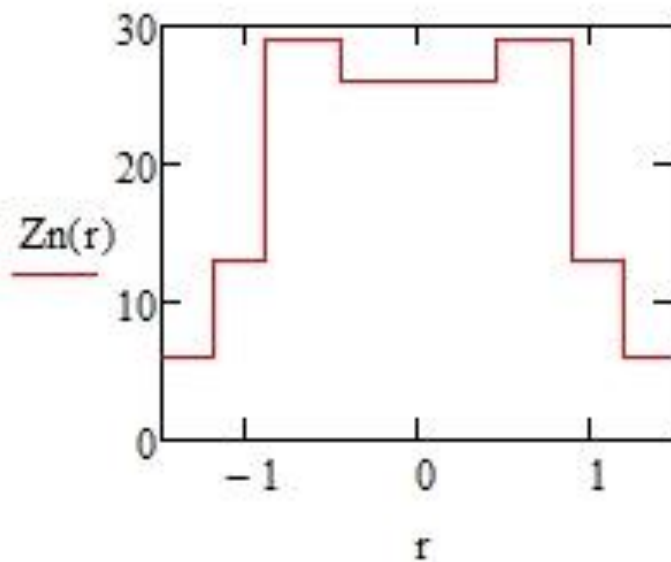
$$\rho_c := 2.26$$

$$\rho_{al} := 2.7$$

$$\rho_{cu} := 8.93$$

$$Z_n(r) := \begin{cases} 6 & \text{if } R_1 < |r| \leq R_0 \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} 13 & \text{if } R_2 < |r| \leq R_1 \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} 29 & \text{if } R_3 < |r| \leq R_2 \\ 26 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

$$\rho_n(r) := \begin{cases} \rho_c & \text{if } R_1 < |r| \leq R_0 \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} \rho_{al} & \text{if } R_2 < |r| \leq R_1 \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} \rho_{cu} & \text{if } R_3 < |r| \leq R_2 \\ \rho_{fe} & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$



$$K_c(x, R, H) := e^{-\text{mascc}(x) \cdot 2 \cdot \rho_c \cdot \sqrt{R^2 - H^2}}$$

$$K_a(x, R, H) := e^{-\text{masal}(x) \cdot 2 \cdot \rho_{al} \cdot \sqrt{R^2 - H^2}}$$

$$K_f(x, R, H) := e^{-\text{masfe}(x) \cdot 2 \cdot \rho_{fe} \cdot \sqrt{R^2 - H^2}}$$

$$K_u(x, R, H) := e^{-\text{mascu}(x) \cdot 2 \cdot \rho_{cu} \cdot \sqrt{R^2 - H^2}}$$

$$\begin{aligned}
\text{YNN}(\text{emax}, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{H}, \text{hcu}) &:= \begin{cases} -\ln \left(\frac{\int_{15}^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \cdot \text{Kc}(x, \text{R0}, \text{H}) \, dx}{\int_{5}^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \, dx} \right) & \text{if } \text{R1} \leq |\text{H}| < \text{R0} \\ -\ln \left(\frac{\int_{15}^{\text{emax}} \frac{\Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \cdot \text{Ka}(x, \text{R1}, \text{H}) \cdot \text{Kc}(x, \text{R0}, \text{H})}{\text{Kc}(x, \text{R1}, \text{H})} \, dx}{\int_{15}^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \, dx} \right) & \text{otherwise} \end{cases} \\
\text{YNN2}(\text{emax}, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{H}, \text{hcu}) &:= \begin{cases} \text{YNN}(\text{emax}, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{H}, \text{hcu}) & \text{if } \text{R2} \leq |\text{H}| < \text{R0} \\ -\ln \left(\frac{\int_{15}^{\text{emax}} \frac{\Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \cdot \text{Ku}(x, \text{R2}, \text{H}) \cdot \text{Ka}(x, \text{R1}, \text{H}) \cdot \text{Kc}(x, \text{R0}, \text{H})}{\text{Ka}(x, \text{R2}, \text{H}) \cdot \text{Kc}(x, \text{R1}, \text{H})} \, dx}{\int_{15}^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \, dx} \right) & \text{otherwise} \end{cases} \\
\text{YNN3}(\text{emax}, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{H}, \text{hcu}) &:= \begin{cases} \text{YNN2}(\text{emax}, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{H}, \text{hcu}) & \text{if } \text{R3} \leq |\text{H}| < \text{R0} \\ -\ln \left(\frac{\int_{25}^{\text{emax}} \frac{\Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \cdot \text{Kf}(x, \text{R3}, \text{H}) \cdot \text{Ku}(x, \text{R2}, \text{H}) \cdot \text{Ka}(x, \text{R1}, \text{H}) \cdot \text{Kc}(x, \text{R0}, \text{H})}{\text{Ku}(x, \text{R3}, \text{H}) \cdot \text{Ka}(x, \text{R2}, \text{H}) \cdot \text{Kc}(x, \text{R1}, \text{H})} \, dx}{\int_{25}^{\text{emax}} \Omega(\text{emax}, x, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{hcu}) \, dx} \right) & \text{otherwise} \end{cases}
\end{aligned}$$

$i := 0..N$

$$\text{hig}_i := \text{YNN}(\text{e2}, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{YY}_i, \text{hfh})$$

$$\text{lo}_i := \text{YNN}(\text{e1}, \text{rsc}, \text{hsc}, \text{YY}_i, \text{hfl})$$

$$\text{f11} := \text{a1}$$

$$\text{f12} := \text{b1}$$

$$\text{f21} := \text{ah}$$

$$\text{f22} := \text{bh}$$

$$r := \text{f11} \cdot \text{f22} - \text{f12} \cdot \text{f21}$$

$$\text{ALL}_i := \frac{(\text{f22} \cdot \text{lo}_i - \text{f12} \cdot \text{hig}_i)}{r}$$

$$\text{BLL}_i := \frac{(-\text{f21} \cdot \text{lo}_i + \text{f11} \cdot \text{hig}_i)}{r}$$

$$\text{Pr}_i := \text{BLL}_i$$

$$\text{PAr}_i := \text{ALL}_i$$

$$\text{vs} := \text{cspline}(\text{YY}, \text{Pr})$$

$$\text{vas} := \text{cspline}(\text{YY}, \text{PAr})$$

$$\text{P}(z) := \text{interp}(\text{vs}, \text{YY}, \text{Pr}, z)$$

$$\text{PA}(z) := \text{interp}(\text{vas}, \text{YY}, \text{PAr}, z)$$

$$\text{PrP}(z) := \frac{d}{dz} \text{P}(z)$$

$$\text{PrA}(z) := \frac{d}{dz} \text{PA}(z)$$

$$i := 0..N$$

$$\text{rr}_i := -R0 + i \cdot \frac{2 \cdot R0}{N}$$

$$\text{PArr}_i := \text{PrA}(\text{rr}_i)$$

$$\text{Prr}_i := \text{PrP}(\text{rr}_i)$$

$$\text{Prr} := \text{medsmooth}(\text{Prr}, 5)$$

$$\text{PArr} := \text{medsmooth}(\text{PArr}, 5)$$

$$\text{vbll} := \text{cspline}(\text{YY}, \text{Prr})$$

$$\text{vall} := \text{cspline}(\text{YY}, \text{PArr})$$

$$\text{Br}(z) := \text{interp}(\text{vbll}, \text{YY}, \text{Prr}, z)$$

$$\text{Ar}(z) := \text{interp}(\text{vall}, \text{YY}, \text{PArr}, z)$$

$$\text{Par}(\text{rr}) := \frac{-1}{\pi} \int_{|\text{rr}|+0.00001}^{R0-0.0001} \frac{\text{Br}(z)}{\sqrt{z^2 - \text{rr}^2}} dz$$

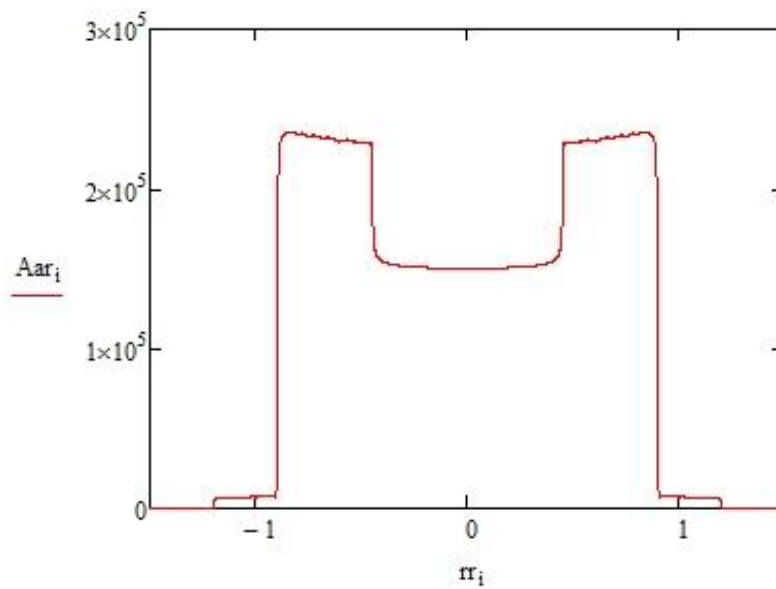
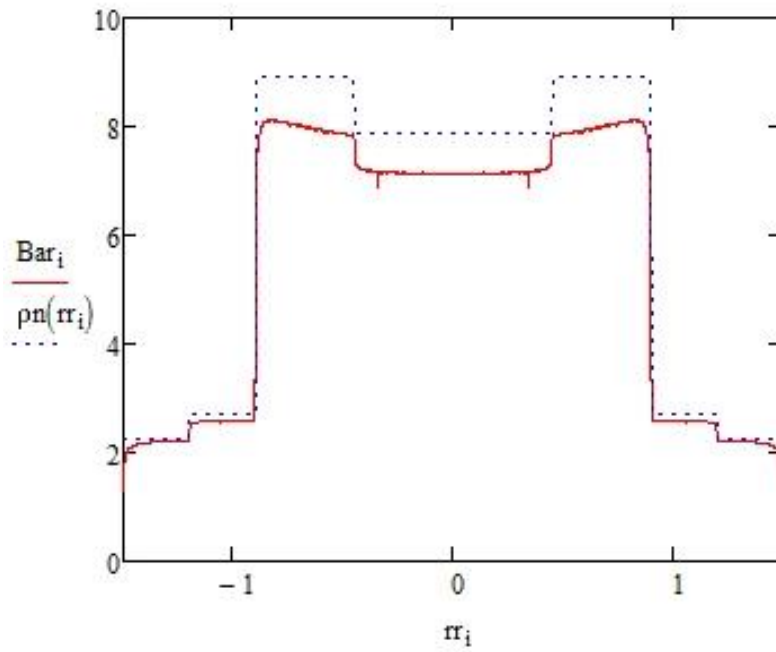
$$\text{PAar}(\text{rr}) := \frac{-1}{\pi} \int_{|\text{rr}|+0.0000000001}^{R0-0.0000000001} \frac{\text{Ar}(z)}{\sqrt{z^2 - \text{rr}^2}} dz$$

$$i := 1..N - 1$$

$$r_i := -R0 + i \frac{2-R0}{N}$$

$$\text{Bar}_i := \text{Par}(r_i)$$

$$\text{Aar}_i := \text{PAar}(r_i)$$



$$\text{Bar}_0 := \text{Bar}_1$$

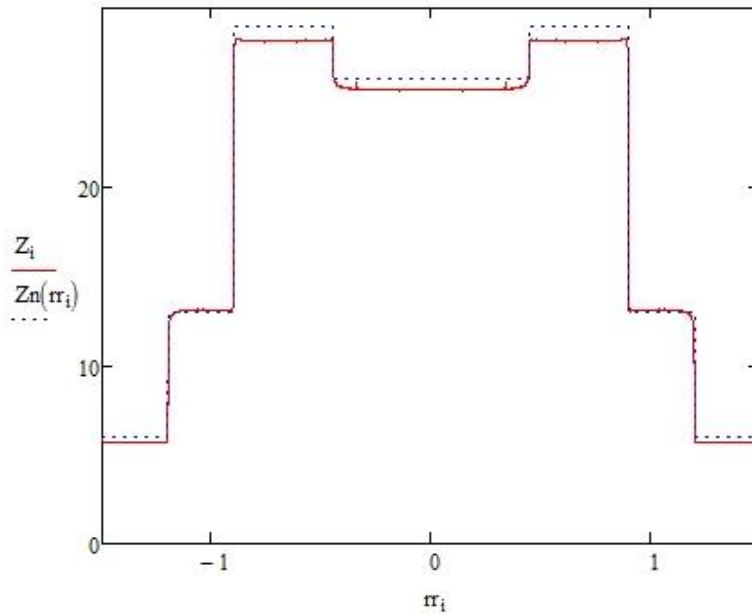
$$\text{Aar}_0 := \text{Aar}_1$$

$$\text{Bar}_N := \text{Bar}_{N-1}$$

$$\text{Aar}_N := \text{Aar}_{N-1}$$

$i := 0..N$

$$Z_i := \left(\frac{\text{Aar}_i}{\text{Bar}_i} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$



$i := 0..N$

$j := 0..N$

$xx_i := -R0 + i \cdot \Delta$

$yy_j := -R0 + j \cdot \Delta$

$$Zr_{i,j} := \begin{cases} Z \left[\text{floor} \left[\frac{R0 - \sqrt{(xx_i)^2 + (yy_j)^2}}{\Delta} \right] \right] & \text{if } (xx_i)^2 + (yy_j)^2 \leq R0^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{red}_{i,j} := \begin{cases} 0 & \text{if } 5 \leq Zr_{i,j} \leq 7 \\ \text{otherwise} & \begin{cases} 0 & \text{if } 12 \leq Zr_{i,j} \leq 14 \\ \text{otherwise} & \begin{cases} 255 & \text{if } 25 \leq Zr_{i,j} \leq 27 \\ \text{otherwise} & \begin{cases} 0 & \text{if } 27 \leq Zr_{i,j} \leq 31 \\ 255 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

```

grini,j := 0 if 5 ≤ Zri,j ≤ 7
           otherwise
             0 if 12 ≤ Zri,j ≤ 14
             otherwise
               0 if 25 ≤ Zri,j ≤ 27
               otherwise
                 255 if 27 < Zri,j ≤ 31
                 255

```

```

rri := floor [ √((xxi)2 + (yyi)2) / Δ ]

```

```

blui,j := 0 if 5 ≤ Zri,j ≤ 7
           otherwise
             255 if 12 ≤ Zri,j ≤ 14
             otherwise
               0 if 25 ≤ Zri,j ≤ 27
               otherwise
                 0 if 27 ≤ Zri,j ≤ 31
                 255

```

```

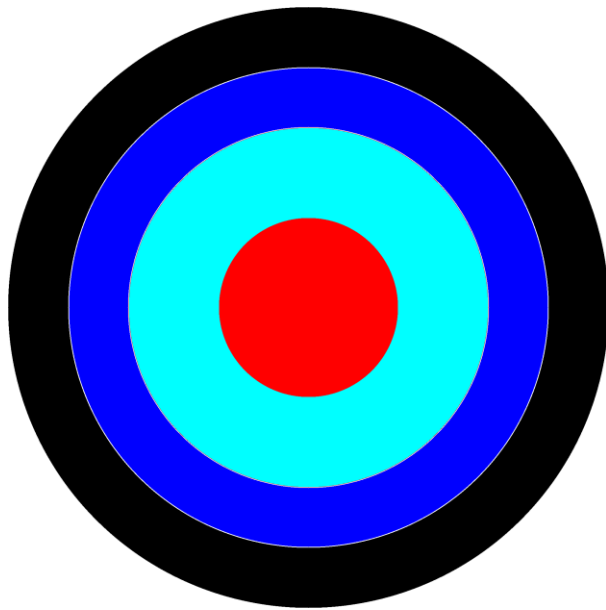
CI := augment(red, grin, blu)

```

```

WRITERGB("Dual color+.bmp") := CI

```



“Dual color+.bmp”

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Разработка НИР производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента-дипломника.

Данная выпускная квалификационная работа заключается в усовершенствовании метода дуальных энергий на основе выбора металлических фильтров. Объектом исследования при ее выполнении является непосредственно метод дуальных энергий.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НТИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- Оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки НТИ;
- Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- Рассчитать бюджет затрат на исследования;
- Произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

К научно-исследовательским работам относятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, которые выполняются с целью расширения, углубления и систематизации знаний по определенной научной проблеме и создания научного задела.

4.1 Технико-экономическое обоснование НИР

Применяемые в промышленности радиационные методы контроля опираются на достижения многих отраслей науки и техники. Они имеют общую физическую основу – закономерности, определяющие формирование радиографического изображения и его информативность. Изучение этих закономерностей позволяет оптимально построить схему радиационного контроля оценить время на его проведение и спрогнозировать получаемое качество. Рентгеновские фильтры — металлические пластины, применяемые для получения практически однородного рентгеновского излучения. Тормозное рентгеновское излучение содержит фотоны всех энергий от максимальной, определяемой приложенным к рентгеновской трубке напряжением, до нуля. При прохождении через рентгеновские фильтры излучение ослабляется неравномерно: количество фотонов малой энергии (длинноволновая часть спектра) уменьшается в большей степени, чем количество фотонов большой энергии (коротковолновая часть спектра). Неравномерность ослабления зависит от материала и толщины рентгеновского фильтра. Фильтрованное излучение содержит относительно большее количество фотонов высокой энергии, становится более жестким.

Применение предварительной фильтрации позволяет ассоциировать трансформированный поток рентгеновского излучения с монохроматическим источником гамма-излучения. Несомненно то, что выбор толщины предварительного фильтра зависит от поставленной задачи.

Коммерческого потенциала у данного исследования нет, поскольку оно выполняется в рамках ВКР и в большей степени олицетворяет теоретическую значимость полученных результатов.

Произведем также в данном разделе SWOT-анализ НТИ, позволяющий оценить факторы и явления способствующие или препятствующие продвижению проекта на рынок. В таблице 4.1 описаны сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы реализации НТИ, которые могут появиться в его внешней среде.

Таблица 4.1 – SWOT-анализ НИР

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
С1. Данный метод все больше и больше изучается, дорабатывается; С2. Метод, описанный в работе, несет в себе экономичность и ресурсоэффективность; С3. Актуальность метода С4.; Наличие опытного руководителя	В1.Нетрудоемкая адаптация научного исследования под иностранные языки; В2.Большой потенциал применения метода в России и других странах;
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с данным методом Сл2. Дороговизна данного метода Сл.3 Сложное оборудование для проведения эксперимента	У1.Отсутствие спроса на данный метод; У2. Возможность создания более доступного в цене аналогового метода

Далее выявим соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды.

Таблица 4.2 – сильные стороны проекта

		С1	С2	С3	С4
Возможности проекта	В1	+	–	+	+
	В2	+	+	+	0

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные стороны и возможности: В1С1С3С4, В2С1С2С3.

Таблица 4.3 – слабые стороны проекта

		Сл1	Сл2	Сл3
Возможности проекта	В1	0	+	0
	В2	0	+	+

Таблица 4.4 – сильные стороны проекта

		С1	С2	С3	С4
Угрозы	У1	+	+	0	–
	У2	+	0	0	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные стороны и угроз: У1С1С2, У2С1С4.

Таблица 4.5 – слабые стороны проекта

Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	–	+	+
У2	0	+	+	

Итак, самой большой угрозой для проекта является отсутствие спроса. Также среди угроз можно отметить дороговизну метода, в следствие чего потребитель будет использовать более дешевые методы.

Что касаясь слабых сторон, то для данного метода, во избежание их влияния, требуется привлечение опытных и квалифицированных специалистов, обеспечить обучение нового персонала со знаниями цифровой радиографии, компьютерной томографии.

Таким образом, несмотря на то, что коммерческого потенциала у данного исследования нет и оно в большей степени олицетворяет теоретическую значимость полученных результатов, результаты НТИ актуальны для предприятий, занимающихся дефектоскопией, рентгенографией, томографией.

4.2 Планирование работ по научно-техническому исследованию

Для правильного планирования, а также финансирования и определения трудоемкости выполнения НИР необходимо ее разбить на этапы. Под этапом понимается крупная часть работы, которая имеет самостоятельное значение и является объемом планирования и финансирования. НИР имеет:

- Подготовительный этап. Сбор, изучение и анализ, имеющийся информации. Определение состава исполнителей и соисполнителей, согласование с ними частных задач. Разработка и утверждение задания.
- Разработка теоретической части.
- Проведение эксперимента
- Выводы и предложения по теме, обобщение результатов разработки.

– Завершающий этап. Рассмотрение результатов исследования.
Утверждение результатов работы. Подготовка отчетной документации.

Данную НИР можно разделить на следующие этапы:

- Разработка задания на НИР;
- Выбор направления исследования;
- Теоретические и экспериментальные исследования;
- Обобщение и оценка результатов;
- Оформление отчета НИР.

Работу выполняло 2 человека: руководитель, студент-дипломник.

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Разделим выполнение дипломной работы на этапы, представленные в таблице 4.6:

Таблица 4.6 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка задания на НИР	1	Составление и утверждение задания НИР	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.
Проведение НИР			
Выбор направления исследования	2	Изучение методов цифровой радиографии	Кытманов Ю.А.
	3	Календарное планирование работ	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.
	4	Подготовка образцов для эксперимента	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение экспериментов	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.
	6	Снятие показаний	Кытманов Ю.А.
	7	Обработка полученных данных	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ полученных результатов, выводы	Кытманов Ю.А.
	9	Оценка эффективности полученных результатов	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.
Оформление отчета НИР	10	Составление пояснительной записки	Кытманов Ю.А.

4.2.1 Определение трудоемкости этапов НИР

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{min\ i} + 2 \cdot t_{max\ i}}{5}, \quad (4.1)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k, \quad (4.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{КГ}}{T_{КГ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (4.4)$$

где $T_{КГ}$ – количество календарных дней в году;

$T_{ВД}$ – количество выходных дней в году;

$T_{ПД}$ – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k = \frac{T_{КГ}}{T_{КГ} - T_{ВД} - T_{ПД}} = \frac{365}{365 - 104 - 10} = 1,45, \quad (4.5)$$

тогда длительность этапов в рабочих днях, следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ T_k нужно округлить до целых чисел.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.7.

4.2.2 Техническая готовность темы

Определение технической готовности темы позволяет дипломнику точно знать, на каком уровне выполнения находится определенный этап или работа. Показатель технической готовности темы характеризует отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период дипломного проектирования составляет примерно 6 месяцев, дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

Для начала следует определить удельное значение каждой работы в общей продолжительности работ:

$$Y_i = \frac{T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

где U_i – удельное значение каждой работы в %;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

T_p – суммарная продолжительность темы, раб.дн.

Тогда техническую готовность темы Γ_i , можно рассчитать по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{i=1} T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (4.7)$$

где $\sum T_{pi}$ – нарастающая продолжительность на момент выполнения i -той работы.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.7 – Временные показатели проведения НИР

№ раб.	Исполнители	Продолжительность работ				
		t_{\min} чел- дн.	t_{\max} чел- дн	$t_{\text{ож}}$ чел- дн	T_p раб.дн	T_k кал.дн
1	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	1	3	1	1	2
2	Кытманов Ю.А.	7	9	7	7	14
3	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	4	10	4	4	8
4	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	11	15	11	11	22
5	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	3	5	3	3	6
6	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	2	3	2	2	4
7	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	5	7	5	5	10
8	Кытманов Ю.А.	3	5	3	3	6
9	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	4	9	4	4	8
10	Кытманов Ю.А.	12	15	12	12	24
ИТОГО						104

4.2.3 Построение графика работ

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Таблица 4.8 – Календарный график проведения НИР

Этапы	Вид работы	Исполнители	T_k	Февраль	Март	Апрель	Май
1	Составление и утверждение задания НИР	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	2				
2	Изучение методов цифровой радиографии	Кытманов Ю.А.	14				
3	Календарное планирование работ	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	8				
4	Подготовка образцов для эксперимента	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	22				
5	Проведение экспериментов	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	6				
6	Снятие показаний	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	4				
7	Обработка полученных данных	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	10				
8	Анализ полученных результатов, выводы	Кытманов Ю.А.	6				
9	Оценка эффективности полученных результатов	Осипов С.П. Кытманов Ю.А.	8				
10	Составление пояснительной записки, Сдача результатов НИР	Кытманов Ю.А.	24				

- руководитель, - студент-дипломник.

В результате видно, что для выполнения исследования требуется всего 2 человека и работа выполняется в течении 104 дней.

4.2.4 Смета затрат на разработку проекта

Затраты представляют собой все производственные формы потребления денег и измеримых в денежном измерении материальных ценностей, которые служат непосредственной производственной целью.

Рассчитываем смету расходов, включая затраты на приобретение необходимого оборудования для разработки проекта и текущие расходы. Затраты, образующие себестоимость продукции (работ, услуг), группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх}} + I_{\text{прочие}} \quad (4.8)$$

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов и сырья, которые входят в состав вырабатываемой продукции, образуя ее основу, или являются необходимыми компонентами при изготовлении продукции.

Для проведения научно-исследовательской работы требуется рентгеновский аппарат Y-xlon, панель Perkin-Elmer 2048x2048, стол с вращением и вертикальным подъемом, ноутбук .

Срок полезного использования каждого вида оборудования:

– Рентгеновский аппарат Y-xlon, панель Perkin-Elmer 2048x2048, стол с вращением и вертикальным подъемом - по пятой группе (оборудование испытательное): 10 лет.

– Ноутбук - по третьей группе (техника электронно-вычислительная): 15 лет.

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Корректно при расчете затрат учитывать в году приобретения и в последующие

годы только ту часть затрат, которая происходит от старения основных фондов в каждом году.

Таблица 4.9– Материальные затраты

Материалы и оборудование	Ед. изм	Срок службы, год	Кол-во материала, ед	Цена за ед, руб	Затраты, руб
Рентгеновский аппарат Y-xlon	шт	10	1	10000000	10000000
Панель Perkin-Elmer 2048x2048	шт	10	1	5000000	5000000
Стол с вращением и вертикальным подъемом	шт	10	1	8000000	8000000
Ноутбук	шт	15	1	105000	105000
Итого:					23105000

Рассчитаем амортизацию оборудования техники $I_{ам.обор}$, по следующей формуле

$$I_{ам.обор} = \left(\frac{T_{исп.обор}}{365} \right) \times K_{обор} \times H_a, \quad (4.9)$$

где $T_{исп.обор}$ – время использования оборудования;

365 дней – количество дней в году;

$K_{обор}$ – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{с.с.обор}}, \quad (4.10)$$

где $T_{с.с.обор}$ – срок службы оборудования

$$I_{ам.аппар.} = \left(\frac{T_{исп.аппар.}}{365} \right) \cdot K_{аппар} \cdot H_a = \left(\frac{6}{365} \right) \cdot 10000000 \cdot \frac{1}{10} = 16000 \quad (4.11)$$

$$I_{ам.пан.} = \left(\frac{T_{исп.пан.}}{365} \right) \cdot K_{пан} \cdot H_a = \left(\frac{6}{365} \right) \cdot 5000000 \cdot \frac{1}{10} = 8000 \quad (4.12)$$

$$I_{ам.стол.} = \left(\frac{T_{исп.стол.}}{365} \right) \cdot K_{стол} \cdot H_a = \left(\frac{6}{365} \right) \cdot 8000000 \cdot \frac{1}{10} = 12800 \quad (4.13)$$

$$I_{ам.ноут..} = \left(\frac{T_{исп.ноут.}}{365} \right) \cdot K_{ноут} \cdot H_a = \left(\frac{80}{365} \right) \cdot 105000 \cdot \frac{1}{15} = 1260 \quad (4.14)$$

$$I_{ам.оборуд..} = 16000 + 8000 + 12800 + 1260 = 38060 \quad (4.15)$$

Расчет заработной платы – заработная плата рассчитывается в соответствии с занятостью исполнителей, с учетом районного и тарифного коэффициентов исполнителей.

В состав затрат на оплату труда включаются:

- выплаты заработной платы за фактически выполненную работу;
- выплаты стимулирующего характера по системным положениям;
- выплаты по районным коэффициентам;
- компенсации за неиспользованный отпуск;
- другие виды выплат.

Примем, что полный фонд заработной платы ($\Phi_{зп}$):

$$\Phi_{зп} = 28000 \text{руб}, \quad (4.16)$$

Отчисления на социальные нужды выражаются в виде единого социального налога, который включает в себя: обязательные отчисления по установленным законодательством нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования.

Единый социальный налог – 30%.

Рассчитываем отчисления на социальные нужды ($I_{соц.отч.}$):

$$I_{соц.отч.} = ЕСН = 0,3 \cdot \Phi_{зп} = 0,3 \cdot 28000 = 8400 \quad (4.17)$$

Накладные расходы используют на следующее:

- затраты на текущий ремонт;
- амортизацию основных производственных фондов;
- затраты на охрану труда и пожарную безопасность.

Для проектных отделов накладные затраты составляют 200% от полного фонда заработной платы Тогда:

$$I_{накл.расх.} = 2 \cdot \Phi_{зп} = 2 \cdot 28000 = 56000 \text{руб}, \quad (4.18)$$

Прочие затраты – затраты, к которым относятся налоги, сборы, отчисления в специальные внебюджетные фонды, платежи по обязательному страхованию имущества, вознаграждения за изобретение и рационализаторские предложения, за подготовку кадров, оплата услуг связи и т.д. Эти затраты составляют 2% от всех издержек и вычисляются по формуле:

$$I_{\text{прочее}} = 0,02 \cdot (\Phi_{\text{зп}} + I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.оборуд.}} + I_{\text{соц.отч.}} = \\ = 0,02 \cdot (28000 + 23105000 + 38060 + 8400) = 463589,2 \quad (4.19)$$

Рассчитываем себестоимость проекта ($K_{\text{проекта}}$).

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх}} + I_{\text{прочие}} \quad (4.20)$$

$$K_{\text{проекта}} = 23105000 + 38060 + 28000 + 8400 + 56000 + 463589,2 = 23699049,2$$

Рассчитываем плановые накопления (ПР). Стоимость проекта включает в себя 30% прибыли, таким образом:

$$ПР = 0,3 \cdot K_{\text{проекта}} = 0,3 \cdot 23699049,2 = 7109714,76 \quad (4.21)$$

Рассчитываем стоимость проекта (Ц).

$$Ц = K_{\text{проекта}} + ПР = 23699049,2 + 7109714,76 = 30808764 \quad (4.22)$$

Таблица 4.10 – Смета затрат на научно-исследовательскую работу

Виды затрат	Обозначение	Сумма затрат, руб.
Амортизация оборудования	$I_{\text{ам,обор}}$	38060
Затраты на оплату труда	ЗП	28000
Отчисления на социальные нужды	$I_{\text{соц.отч}}$	8400
Накладные расходы	$I_{\text{накл.расх}}$	56000
Прочие затраты	$I_{\text{прочее}}$	463589,2
Себестоимость проекта	$K_{\text{проекта}}$	23699049,2
Плановые накопления (прибыль)	ПР	7109714,76
Стоимость проекта (цена)	Ц	30808764

Исходя из расчетов и полученных результатов приведенных в таблице 4.10, можно сделать вывод, что данная НИР входит в обозначенные бюджетные ограничения, так как стоимость проекта равная 30808764 рублей, меньше приблизительной суммы затрат равной 35000000 рублей.

4.3 Оценка целесообразности исследования

4.3.1 Оценка научно-технического уровня следования

Для определения научно - технического уровня проекта, его научной ценности, технической значимости и эффективности необходимо, рассчитать коэффициент научно-технического уровня (НТУ).

Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок. Суть метода состоит в присвоении каждому из признаков НТУ определенного числа баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик.

Формула для определения общей оценки:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i \quad (4.23)$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

Π_i – количественная оценка i – го признака.

Таблица 4.11 – Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0,7
Теоретический уровень	0,5
Возможность реализации	0,5

Таблица 4.12 – Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	Высокий НТУ

Таблица 4.13 – Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Разработка нового метода	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ	8
Разработка численных экспериментов	6
Элементарный анализ результатов исследования	3

Таблица 4.14 – Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	5
Свыше 10 лет	3

Расчет НТУ:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i$$

где $k_1 = 0,8$; $k_2 = 0,5$; $k_3 = 0,5$; $\Pi_1 = 9$; $\Pi_2 = 6$; $\Pi_3 = 4$;

$$\text{НТУ} = 0,7*9+0,6*6+0,5*4 = 11,4.$$

По полученным значениям коэффициент научно-технического уровня (НТУ) можно сказать о достаточно высоком его уровне, его научной ценности, технической значимости и эффективности.

4.3.2 Оценка возможных рисков

Произведем оценку рисков, которое является одним из важнейших моментов при создании проекта. Учет рисков даст возможность избежать риски, вызванные опасными факторами, которые негативно отражаются на внедрении в жизнь проекта.

При оценке важности рисков оценивается вероятность их наступления (P_i). По шкале от 0 до 100 процентов: 100 – наступит точно, 75 – скорее всего наступит, 50 – ситуация неопределенности, 25 – риск скорее всего не наступит, 0 – риск не наступит. Оценка важности риска оценивается весовым коэффициентом (w_i). Важность оценивается по 10- балльной шкале b_i . Сумма весовых коэффициентов должна равняться единице. Оценка важности рисков приведена в таблицах 4.15-4.19.

Таблица 4.15 – Социальные риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Низкая квалификация персонала	0	2	0,061	0
2	Непросвещенность предприятий о данном методе	50	4	0,168	8,928
3	Несоблюдение техники безопасности	25	6	0,23	6,25
4	Увеличение нагрузки на персонал	50	4	0,168	8,928
	Сумма		16	0,627	24,1

Таблица 4.16 – Экономические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Инфляция	100	2	0,029	1,960
2	Экономический кризис	25	3	0,049	0,980
3	Непредвиденные расходы в плане работ	25	5	0,126	5,862
4	Сложность выхода на мировой рынок	75	6	0,136	10,29
	Сумма		16	0,34	19,92

Таблица 4.17 – Технологические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Возможность поломки оборудования	25	6	0,24	5,25
2	Низкое качество поставленного оборудования	25	8	0,313	7,0357
	Сумма		14	0,553	12,2857

Таблица 4.18 – Научно-технические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Развитие конкурентных методов	50	5	0,135	8,936
2	Отсутствие результата в установленные сроки	25	6	0,123	6,25
3	Несвоевременное патентование	25	8	0,176	3,657
	Сумма		19	0,434	18,843

Таблица 4.19 – Общие риски

№ п/п	Риски	b_i	w_i	$b_i \cdot w_i$
1	Социальные	16	0,627	10,03
2	Экономические	16	0,34	5,44
3	Технологические	14	0,553	7,742
4	Научно-технические	19	0,434	8,246
Итого				31,458

Расчет рисков дает общую оценку в 31,458. Эта цифра говорит, что проект имеет право на жизнь, хотя и не лишен вероятных препятствий.

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены следующие задачи:

1) Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа, результат которого показал большой потенциал применения метода.

2) Определен полный перечень работ, проводимых при компьютерном моделировании. Определена трудоемкость проведения работ. Общая максимальная длительность выполнения работы составила 104 календарных дня.

3) Суммарный бюджет затрат НИР составил – 30808764рублей.

4) Определена целесообразность и эффективность научного исследования путем оценки научно-технического уровня проекта, а также оценки возможных рисков. В результате проводимое исследование имеет высокую значимость теоретического уровня и приемлемый уровень рисков.

Следует отметить важность для проекта в целом, проведенных в данной главе работ, которые позволили объективно оценить эффективность проводимого научно-технического исследования.

5. Социальная ответственность

Цифровая радиография является одним из самых востребованных и интенсивно развивающихся методов неразрушающих испытаний разнообразных объектов. В настоящее время широко развивается цифровая рентгенография, отличительной особенностью которой является высокая производительность. Особенно широки области применения одной из разновидностей цифровой рентгенографии – метода дуальных энергий.

5.1 Производственная безопасность

5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

В таблице 5.1 приведены элементы рентгеновского комплекса, которые представляют собой опасные и вредные факторы.

Таблица 5.1–Основные элементы рентгеновского комплекса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Обработка результатов измерений за компьютером	Воздействие излучений (электромагнитное и радиочастотное); Недостаточная освещенность рабочей зоны; Отклонение показателей микроклимата от нормальных; Влияние шума	Электрический ток	СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96; ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ; СНиП 23-05-95; СанПиН 2.2.4.548-96;
Работа с рентгеновской установкой	Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне		НРБ-99/2009; СП 2.6.1.2523-09

Рассмотрим выявленные факторы более подробно.

5.2. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

5.2.1 Воздействие неионизирующих излучений

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Воздействие ЭМП негативно сказывается на здоровье человека. Симптомы воздействия электромагнитного поля:

- утомляемость,
- раздражительность,
- нарушения сна,
- нарушения памяти и внимания

ПЭВМ являются источниками широкополостных электромагнитных излучений:

- ультрафиолетового 200–400 нм;
- видимого 400–750 нм;
- ближнего ИК 750–2000 нм;
- радиочастотного диапазона 3кГц;
- электростатических полей.

Таблица 5.2 – Предельно допустимый уровень

Нормируемый параметр	ПДУ
Напряженность электрического поля на расстоянии 50 см от монитора в диапазоне частот: 5 Гц –2 кГц 2кГц– 400 кГц	25 В/м 2,5 В/м
Плотность потока магнитной индукции на расстоянии 50 см от монитора в диапазоне частот: 5 Гц –2 кГц 2кГц– 400 кГц	250 нТл 25 нТл
Эквивалентный поверхностный электростатический потенциал экрана монитора	500 В

Для уменьшения воздействия электромагнитного излучения на организм необходимо выполнять следующие меры:

- расстояние до монитора должно составлять не менее 50 см;
- не допускается использование мерцающего монитора (нужно использовать монитор с частотой кадров не менее 70 Гц);
- расположение верхнего края монитора должно располагаться на уровне глаз;
- не допускается освещение экрана прямыми яркими источниками;
- использование монитора с низким разрешением;
- необходимы регулярные перерывы в работе.

5.2.2 Электрический ток

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с комплексом в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор установки работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта частей рентгеновского комплекса;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей компьютера или установки);

- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности рентгеновского аппарата У-Х10п и связанного с ним комплекса сводятся к следующим действиям: отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы; вывешивание плакатов, указывающих место работы; заземление корпусов всех установок через нулевой провод; покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией; недоступность токоведущих частей аппаратуры (токоведущие части и элементы необходимо закрывать в непроводящие ток корпуса).

Предъявляются следующие технические требования к персональным компьютерам в лабораторных условиях:

- для электропитания компьютеров должна быть смонтирована отдельная сеть электроснабжения;

- не допускается использование оборудования без подключения к защитному заземлению, если такое подключение предусмотрено конструкцией оборудования;

- не допускается использование оборудования с открытыми корпусами, если это не является основным режимом работы оборудования;

- электрические розетки системы электропитания должны располагаться таким образом, чтобы кабели электропитания оборудования, расположенного на рабочем месте, не пересекали рабочее место (были направлены от места расположения пользователя).

5.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Освещение – процесс получения, распределения и использования световой энергии, обеспечивающий благоприятные условия видения объектов и

предметов. Освещенность рабочего места влияет на самочувствие и настроение человека, определяет эффективность его труда.

Использование рационального освещения помещений и рабочих мест, является одним из важнейших условий создания безопасных и благоприятных условий труда.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. Помещения со специальным оборудованием должны иметь естественное и искусственное освещение СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение». Для данного типа, относящихся к 3 разряду – высокая точность работ, минимальная освещенность в лаборатории должна составлять 300-500 лк. В следствие производственной необходимости работа в лаборатории производится без естественного освещения, данные условия согласованы с органами государственного надзора за охраной труда. Общее освещение лаборатории должно быть выполнено в виде сплошных или прерывистых линий светильников, которые располагаются в стороне от рабочих мест параллельно линии зрения работников. Допускается размещение линии светильников искусственного освещения локально над рабочими местами. Для общего освещения необходимо применять светильники с рассеивателями и зеркальными экранами сетками или отражателями, укомплектованные высокочастотными пускорегулирующими аппаратами. Применение светильников без рассеивателей и экранных сеток запрещается.

5.2.4 Отклонение показателей микроклимата от нормальных

Воздух рабочей зоны производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с СанПиН 2.2.4.548–96.

Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений и приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548–96)

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Температура воздуха, С°	Температура поверхностей, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	IIa (175–232)	19–21	18–22	60–40	0,2
Теплый	IIa (175–232)	20–22	19–23		

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека - не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция. (СНиП 2.09.04-87)

5.2.5 Повышенный уровень шумов

Повышенный шум ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум в лаборатории создается работающими установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. На рабочем месте лаборанта уровень шума не должен превышать 50 дБ.

5.2.6 Повышенный уровень ионизирующего излучения

Защита персонала и гражданского населения в соответствии с нормативами СП 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) обеспечивается конструкцией радиационной защиты специально оборудованного помещения, в котором располагается экспериментальная рентгеновская установка. К работе с рентгеновским аппаратом допускается предварительно обученный персонал группы А и Б. Согласно НРБ–99/2009 существует 2 категории облучаемых лиц:

- персонал – лица, непосредственно работающие с техногенными источниками (группа А) и лица, которые находятся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б)
- население (все население, а также лица из персонала, вне сферы их производственной деятельности).

Допустимые значения эффективных доз для указанных категорий облучаемых лиц приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Допустимые пределы эффективных доз для категорий

Нормируемые величины	Пределы дозы		
	Персонал (группа А)	Персонал (группа Б)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет. но не более 50 мЗв в год	5 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет. но не более 12,5 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет. но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год:			
в хрусталике глаза	150 мЗв	37,5 мЗв	15 мЗв
коже	500 мЗв	125 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	125 мЗв	50 мЗв

Для инженеров лаборатории (персонал группы А) допустимая эффективная доза составляет 20 мЗв в год в среднем за последовательные 5 лет,

но не более 50 мЗв в год. Облучение эффективной дозой свыше 200 мЗв в течение года должно рассматриваться как потенциально опасное. Лица, подвергшиеся такому облучению, должны немедленно выводиться из зоны облучения и направляться на медицинское обследование. Последующая работа с источниками излучения этим лицам может быть разрешена только в индивидуальном порядке с учетом их согласия по решению компетентной медицинской комиссии.

Мероприятия для предотвращения облучения выше нормы. Перед проведением эксперимента персонал заблаговременно обязан покинуть помещение с рентгеновской установкой, плотно закрыть двери и убедиться, что все необходимые условия безопасности выполнены. Работа рентгеновского аппарата сопровождается звуковым сигналом с временным запасом 10 секунд, таким образом, вероятность нахождения персонала в бункере во время работы по причине рассеянности сведена к минимуму. К названным мерам следует добавить использование индивидуального нагрудного дозиметра. Также для большей безопасности перед помещением со стороны входа выставляется знак «Осторожно, радиация» и ведется постоянное видеонаблюдение за помещением.

Для организации безопасной работы с рентгеновской установкой выделяют 4 принципа:

- уменьшение мощности источников до минимальных величин («защита количеством»);
- сокращение времени работы с источниками («защита временем»);
- увеличение расстояния от источников до работающих («защита расстоянием»);
- экранирование источников излучения материалами, поглощающими ионизирующее излучение («защита экранами»).

«Защита количеством» подразумевает под собой уменьшение мощности бетатрона для того, чтобы доза, полученная в результате работы, не превышала норм. Для реализации данного типа защиты, помимо ПО, в пультовой комнате

установлен специальный пульт, который позволяет снижать до минимума уровень излучения. «Защита временем» основывается на тех же закономерностях, что и «защита количеством». Сокращая срок работы с комплексом, можно в значительной степени уменьшить дозы облучения работников лаборатории. При перегреве сотрудники лаборатории отключают установку, тем самым получая «защиту временем». «Защита расстоянием» подразумевает собой работу на максимальном удалении от источника излучения. Поглощенная доза обратно пропорциональна расстоянию, поэтому этот фактор очень важен. В лаборатории с досмотровым комплексом пультовая комната находится на удалении от бетатрона, и в стороне от основного пучка излучения.

«Защита экранами» – перекрытие основного пучка излучения материалами, которые будут поглощать часть излучения. Для изготовления экранов применяют различные материалы, а их толщина определяется мощностью излучения. Пультовая имеет стены со слоем свинца и большой толщиной бетона, а также свинцовую дверь, которая закрывается на время работы бетатрона. Свинец является одним из лучших экранов для поглощения излучения.

5.3 Экологическая безопасность

Вопрос об охране экологического состояния Земли в последние годы поднимается все активнее. Увеличение содержания углекислого газа в атмосфере, истощение озонового слоя и прочие загрязнения природы приводят к тому, что в природе изменяются привычные для данного периода условия обитания. Электроника и линейки не несут в себе большой экологической угрозы. Материалы, с которыми проводятся опыты, а именно: медь, алюминий, вольфрам – в последствие остаются для вторичного использования. Часть из них остается как основа для дальнейшего исследования, часть перерабатывается для последующего использования в других отраслях.

Согласно СП 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009), в случае возникновения аварии должны быть приняты практические меры для восстановления контроля над источником излучения и сведения к минимуму доз облучения, количества облученных лиц, радиоактивного загрязнения окружающей среды. При радиационной аварии или обнаружении радиоактивного загрязнения ограничение облучения осуществляется защитными мероприятиями, применимыми, как правило, к окружающей среде и (или) к человеку. Так как досмотровый комплекс является источником искусственно создаваемого излучения, для предотвращения аварийных ситуаций предусмотрено 3 ступени быстрого ручного отключения установки, после которого излучение мгновенно прекращается и опасность экологического загрязнения и вредных воздействий на человека исчезает.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Безопасность в чрезвычайных ситуациях нормируется ГОСТ Р 22.0.01-94 и ГОСТ Р 22.0.07-95. Вероятными чрезвычайными ситуациями, которые могут возникнуть при проведении данного научного исследования, являются:

- разрушение зданий и/или сооружений;
- пожары;

5.5 Разрушение зданий и/или сооружений

Разрушение зданий и сооружений может быть следствием взрыва лабораторного оборудования по причине его неисправности, либо по причине отсутствия контроля за техническим состоянием конструкции. Первые признаки разрушения здания – это трещины, которые начинают проявляться в результате механического воздействия, вибрации оборудования и т.д.

При малейших признаках обрушения необходимо укрыться в местах, где маловероятно поражение обломками (дверные проемы, углы). Движение в полуразрушенном здании очень опасно, так как его разрушение может

продолжиться. В связи с этим необходимо привлечь к себе внимание спасателей криками и ждать помощи. Запрещается возвращаться в разрушенное строение за имуществом. Безопасное расстояние от рушащегося здания – расстояние, равное его высоте.

5.6 Пожарная безопасность

Возможные причины загорания:

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

Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному).
- позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел.112.
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

5.7 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.7.1 Организационные мероприятия

1. К работе с радиоактивными веществами и ионизирующими излучениями допускаются лица, достигшие 18 лет, которые прошли специальное медицинское обследование состояния здоровья и были признаны по результатам этого обследования пригодными к указанной работе. Беременные женщины к таким работам не допускаются.

2. Перед началом работы с радиоактивными веществами и ионизирующими излучениями в зависимости от технического и научного уровня и характера работ каждый работник должен пройти специальное обучение и сдать соответствующий экзамен по технике радиационной безопасности. Проверяемый заносится в специальный журнал и отмечается после проверки знаний техники безопасности.

3. Все работы с радиоактивными веществами и ионизирующими излучениями должны проводиться в условиях строжайшего соблюдения правил радиационной безопасности и при наличии постоянного контроля со стороны лиц, ответственных за радиационную безопасность в данном учреждении.

4. В помещениях, где проводятся работы с радиоактивными веществами, запрещается:

- пребывание работников без необходимых средств индивидуальной защиты;
- хранение пищевых продуктов, табачных изделий, косметики, домашней одежды и других предметов, не имеющих прямого отношения к выполняемым работам;
- прием пищи, курение, пользование косметикой

Молодые люди, не достигшие возраста 18 лет, на вредные или опасные работы не допускаются. Об этом говорится в ст. 265 ТК РФ. Перечень работ, при выполнении которых запрещается применение труда лиц моложе 18 лет, утвержден Постановлением Правительства РФ от 25.02.2000 N 163.

5.7.2 Организация рабочей зоны

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

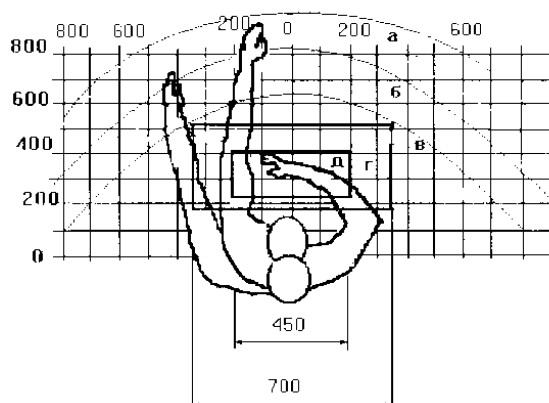


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей персонального компьютера размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в шкафу для хранения – литература, которая не используется постоянно, но нужна при возникновении внештатных ситуаций.

Заключение

Анализ результатов теоретических исследований и расчётов доказывает возможность точной оценки пространственного распределения эффективного атомного номера способом компьютерной томографии в комплексе с псевдо-монохроматическим методом дуальных энергий.

Выбор толщин фильтров предварительной фильтрации рентгеновского излучения основывается на компромиссе между увеличением точности оценок пространственных распределений плотности и эффективного атомного номера и снижением производительности контроля по сравнению с классической реализацией метода дуальных энергий в компьютерной томографии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hsieh J. Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances. – Bellingham, WA: SPIE, 2003.
2. Joseph P.M., Spital R.D. A method for correcting bone induced artifacts in computed tomography scanners // Journal of computer assisted tomography. – 1978. – Vol. 2. – no. 1. – P. 100–108.
3. Glover G.H., Pelc N.J. Nonlinear partial volume artifacts in x-ray computed tomography // Medical physics. – 1980. – Vol. – no. 3. – P. 238–248.
4. Nedavnii O.I., Osipov S.P., Sidulenko O.A. Choice of the compensating filter profile in images restoration for objects with annular structures in X-ray computational tomography // Russian journal of nondestructive testing. – 2002. – Vol. 38. – no. 4. – C. 261–265.
5. Kelcz F., Joseph P.M., Hilal S.K. Noise considerations in dual energy CT scanning // Medical Physics. – 1979. – Vol. 6. – no. 5. – P. 418 – 425.
6. Alvarez R.E., Macovski A. Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography // Physics in Medicine and Biology. – 1976. – Vol. 21. – no. 5. – P. 733–744.
7. Kalender W.A., Perman W.H., Vetter J.R., Klotz E. Evaluation of a prototype dual energy computed tomographic apparatus. I. Phantom studies // Medical physics. – 1986. – Vol. 13. – no. 3. – P. 334–339.
8. Brooks, R.A. A quantitative theory of the Hounsfield unit and its application to dual energy scanning // Journal of computer assisted tomography. – 1977. – Vol. 1. – no. 4. – P. 487–493.
9. Rutt B., Henster A. Split-filter computed tomography: A simple technique for dual energy scanning // J Comput Assist Tomogr. – 1980. – Vol. 4. – no. 4. – P. 501–509.
10. Wetter O.E. Imaging in airport security: Past, present, future, and the link to forensic and clinical radiology // Journal of Forensic Radiology and Imaging. – 2013. – Vol. 1. – no. 4. – P. 152–160.

11. Mery D. Computer vision technology for X-ray testing // *Insight-non-destructive Testing and Condition Monitoring*. – 2014. – Vol. 56. – no. 3. – P. 147–155.
12. Fantidis J.G., Nicolaou G.E. A transportable fast neutron and dual gamma-ray system for the detection of illicit materials // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2011. – Vol. 648. – no. 1. – P. 275–284.
13. Чахлов С.В., Осипов С.П. Высокоэнергетический метод дуальных энергий для идентификации веществ объектов контроля // *Контроль. Диагностика*. – 2013. – № 9. – С. 9–17.
14. Осипов С.П., Темник А.К., Чахлов С.В. Влияние физических факторов на качество идентификации веществ объектов контроля высокоэнергетическим методом дуальных энергий // *Дефектоскопия*. – 2014. – № 8. – С. 70-77.
15. Yang M., Virshup G., Clayton J., Zhu X. R., Mohan R., Dong L. Theoretical variance analysis of single-and dual-energy computed tomography methods for calculating proton stopping power ratios of biological tissues // *Physics in Medicine and Biology*. – 2010. – Vol. 55. – no. 5. – P. 1343–1362.
16. Mouton A., Breckon T.P. Materials-based 3D segmentation of unknown objects from dual-energy computed tomography imagery in baggage security screening // *Pattern Recognition*. – 2015. – Vol. 48. – no. 6. – P. 1961–1978.
17. Martin L., Tuysuzoglu A., Karl W.C., Ishwar P. Learning-based object identification and segmentation using dual-energy CT images for security // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2015. – Vol. 24. – no. 11. – P. 4069–4081.
18. Brooks R.A., Di Chiro G. Beam hardening in x-ray reconstructive tomography // *Physics in Medicine and Biology*. – 1976. – Vol. 21. – no. 3. – P. 390–398.
19. Herman G.T. Correction for beam hardening in computed tomography // *Physics in medicine and biology*. – 1979. – Vol. 24. – no. 1. – С. 81–106.

20. Wildenschild D., Vaz C.M.P., Rivers M.L., Rikard D., Christensen B.S.B. Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations // *Journal of Hydrology*. – 2002. – Vol. 267. – no. 3. – P. 285–297.
21. Ketcham R.A., Hanna R.D. Beam hardening correction for X-ray computed tomography of heterogeneous natural materials // *Computers & Geosciences*. – 2014. – Vol. 67. – P. 49–61.
22. Wellington S.L., Vinegar H.J. X-ray computerized tomography // *Journal of Petroleum Technology*. – 1987. – Vol. 39. – no. 8. – P. 885–898.
23. Yu L., Leng S., McCollough C.H. Dual-energy CT–based monochromatic imaging // *American Journal of Roentgenology*. – 2012. – Vol. 199. – no. 5. – P. S9–S15.
24. Stehli J., Fuchs T.A., Singer, A., Bull S., Clerc O. F., Possner M., Gaemperli O., Buechel R.R., Kaufmann P.A. First experience with single-source, dual-energy CCTA for monochromatic stent imaging // *European Heart Journal-Cardiovascular Imaging*. – 2015. – Vol. 16. – no. 5. – P. 507–512.
25. Johnson T.R.C. Dual-energy CT: general principles // *American Journal of Roentgenology*. – 2012. – Vol. 199. – n. 5. – P. S3–S8.
26. Tachibana R., Näppi J.J., Kim S.H., Yoshida H. Electronic cleansing for dual-energy CT colonography based on material decomposition and virtual monochromatic imaging // *SPIE Medical Imaging*. – International Society for Optics and Photonics. – 2015. – C. 94140Q–94140Q–7.
27. Osipov S., Libin E., Chakhlov S., Osipov O., Shtein A. Parameter identification method for dual-energy X-ray imaging // *NDT & E International*. – 2015. – Vol. 76. – P. 38–42.
28. Kuchenbecker S., Faby S., Sawall S., Lell M., Kachelrieß M. Dual energy CT: how well can pseudo-monochromatic imaging reduce metal artifacts? // *Medical Physics*. – 2015. – Vol. 42. – no. 2. – P. 1023–1036.
29. Gamma data for elements. <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/gdfe.php>

30. Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001-100 МэВ и элементов с 1 по 100): Справочник. – М: Атомиздат, 1973.
31. Lehmann L.A. Alvarez R.E., Macovski A., Brody W.R., Pelc N.J., Riederer S.J., Hall A.L. Generalized image combinations in dual KVP digital radiography // *Medical Physics*. – 1981. – Vol. 8. – no. 5. – P. 659–667.
32. Ying Z., Naidu R., Crawford C.R. Dual energy computed tomography for explosive detection // *Journal of X-ray Science and Technology*. – 2006. – Vol. 14. – no. 4. – P. 235–256.
33. 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.
34. Zav'yalkin F.M., Osipov S.P. Calculation of the scattering function of a multichannel scintillation detector used to record high-energy photon radiation // *Soviet Atomic Energy*. – 1986. – Vol. 60. – no. 2. – P. 186–188.
35. Schiff L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // *Physical review*. – 1951. – Vol. 83. – P. 252–253.
36. Ali E.S.M., Rogers D.W.O. Functional forms for photon spectra of clinical linacs // *Physics in Medicine and Biology*. – 2011. – Vol. 57. – P. 31–50.
37. Klimenov V.A., Osipov S.P., Temnik A.K. Identification of the substance of a test object using the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2013. – Vol. 49. – no. 11. – C. 642–649.
38. Osipov S.P., Temnik A.K., Chakhlov S.V. The effects of physical factors on the quality of the dual high-energy identification of the material of an inspected object // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2014. – Vol. 50. – no. 8. – P. 491–498.
39. Osipov S., Chakhlov S., Osipov O., Shtein A., Van J. Adequacy criteria of models of the cargo inspection system with material discrimination option // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 671. – No. paper 012010. – 6 p.

40. Stribeck N., Nöchel U., Almendárez Camarillo A. Scanning microbeam X-ray scattering of fibers analyzed by one-dimensional tomography // *Macromolecular Chemistry and Physics*. – 2008. – Vol. 209. – no. 19. – P. 1976–1982.
41. Veera U.P. Gamma ray tomography design for the measurement of hold-up profiles in two-phase bubble columns // *Chemical Engineering Journal*. – 2001. – Vol. 81. – no. 1. – P. 251–260.
42. Swanpalmer J., Kullenberg R., Hansson T. The feasibility of triple-energy absorptiometry for the determination of bone mineral, Ca and P in vivo // *Physiological Measurement*. – 1998. – Vol. 19. – no. 1. – P. 1–15.
43. СанПиН 2.2.4.548–96 – Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы.
44. СНиП 23–05–95*, СП 52.13330.2011 – Естественное и искусственное освещение.
45. НРБ–99/2009 – Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523–09 "Нормы радиационной безопасности.
46. ГОСТ Р 22.0.01-94 Безопасность в ЧС. Основные положения.
47. ГОСТ Р 22.0.07-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.
48. ГОСТ 12.0.003–74 – Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1)