

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

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Совершенствование метода дуальных энергий в рентгеновской вычислительной томографии на основе предварительной фильтрации излучения
УДК 620.179.152.1:539.1.074

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ71	Кытманов Юрий Александрович		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Подопригора И. В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Дашковский А. Г.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Федоров Е. М.	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Р1	Применять навыки эффективной индивидуальной и командной работы, включая руководство командой, работу по междисциплинарной тематике с учетом этики и корпоративных интересов, в том числе и на иностранном языке.	Требования ФГОС (УК-1, УК-3, УК-4, УК-5, УК-6, ОПК- 1, ОПК-2, ПК-12), CDIO Syllabus (2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.2, п. 2.3, п. 2.4, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю,)
Р2	Применять навыки управления разработкой и производством продукции на всех этапах ее жизненного цикла с учетом инновационных рисков коммерциализации проектов, в том числе в нестандартных ситуациях.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, УК-6, ОПК-2, ОПК-3, ПК-6, ПК -8), CDIO Syllabus (2.1, 2.4, 2.5, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.3, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (29.004 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, 40.053 Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса, 40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 29.006 Специалист по проектированию систем в корпусе, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)
Р3	Собирать, хранить, обрабатывать, использовать, представлять и защищать информацию при соблюдении требований информационной безопасности и корпоративной культуры.	Требования ФГОС (УК-5, УК-6, ОПК-1, ПК-1, ПК-3, ПК-4, ПК-9), CDIO Syllabus (1.1, 2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI , требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю.
Р4	Применять навыки планирования, подготовки, проведения теоретических и экспериментальных исследований, а также представления и интерпретации полученных результатов.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, ОПК-2, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-8, ПК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п.1.2, п.1.4), CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 4.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами)
Р5	Разрабатывать нормативную, техническую и методическую документацию в области неразрушающего контроля и измерительной техники.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, ОПК-2, ПК-3, ПК-9, ПК- 11), CDIO Syllabus (1.2, 4.4), Критерий 5 АИОР (п.1.3, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник)
Р6	Быть готовым к комплексной профессиональной деятельности при разработке инновационных и эффективных методов и средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, ОПК-2, ОПК-3, ПК-5, ПК-6, ПК-8, ПК- 10, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-15), CDIO Syllabus (1.2, 1.3, 2.3, 4.1, 4.4, 4.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.3, п. 1.4, п.1.5, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.016 Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов, 29.004 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, 40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, 29.006 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов
Р7	Разрабатывать и внедрять энерго- и ресурсоэффективные технологические процессы производства приборных систем с использованием высокотехнологичных средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (УК-2, УК-6, ОПК-3, ПК-7, ПК-8, ПК-10. ПК- 11, ПК-12, ПК-14, ПК -15), CDIO Syllabus (1.3, 4.1, 4.2, 4.5. 4.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.016 Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов, 29.004 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, 40.053 Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса)

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) Федоров Е.М.
 (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме: _____
 Магистерской диссертации

Студенту: _____

Группа 1БМ71	ФИО Кытманову Юрию Александровичу
-----------------	--------------------------------------

Тема работы: _____
 Совершенствование метода дуальных энергий в рентгеновской вычислительной томографии на основе предварительной фильтрации излучения
 Утверждена приказом директора (дата, номер) | 11.12.2017, №9732/с
 Срок сдачи студентом выполненной работы: | 04.06.2019

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 профиля предварительного фильтра.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Проведение расчётов и экспериментальных исследований и разработка на основе их результатов методики выбора профиля металлических фильтров в цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии с функцией дуальных энергий. 2. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 3. Социальная ответственность 4. Заключение и выводы
Перечень графического материала	1. Схемы 2. Изображения 3. Графики
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультанты
1. Обзор литературы и постановка задач. 2. Математическая модель формирования итоговых проекций в	Осипов Сергей Павлович

<p>системе компьютерной томографии с режимом дуальных энергий с учётом профиля предварительного фильтра излучения.</p> <p>3. Трансформация проекций в КТ с режимом МДЭ в проекции параметров МДЭ.</p> <p>4. Выбор профилей предварительных фильтров в КТ с режимом дуальных энергий.</p> <p>5. Точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера методом КТ с режимом дуальных энергий учётом выравнивающих фильтров с рациональным профилем.</p>	
<p>6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</p> <p>7. Социальная ответственность.</p>	<p>Подопригора Игнат Валерьевич</p> <p>Дашковский Анатолий Григорьевич</p>
<p>Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Упрощенная реализация метода дуальных энергий в компьютерной томографии</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>05.10.2017</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ71	Кытманов Юрий Александрович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ71	Кытманов Юрий Александрович

Школа	ИШНКБ	Отделение школы (НОЦ)	ОКД
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Приборостроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Расчет стоимости материалов Накладные расходы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы и нормативы расходования ресурсов отсутствуют
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды-28% от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Определены потенциальные потребители результатов НТИ Проведён анализ конкурентных технических решений и SWOT-анализ
2. Разработка устава научно-технического проекта	Цели и результаты проекта Построена организационная структура проекта, определены ограничения и допущения проекта
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Разработан план проекта Определены бюджет и риски проекта
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведена оценка сравнительно эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT-анализа
5. Линейный график проведения и бюджет НТИ
6. Диаграмма Ганта проведения НТИ
7. Потенциальные риски
8. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	11.03.19
-------------------------------------------------------------	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ71	Кытманов Юрий Александрович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ71	Кытманову Юрию Александровичу

Школа	ИШНКБ	Отделение (НОЦ)	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Помещение с естественной вентиляцией воздуха, расположенное на 2 этаже, 2-х этажного производственного корпуса. В помещении расположено оборудование: 2 компьютера. Площадь помещения составляет: 15 м ² .
2. Отбор законодательных и нормативных документов по теме	Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Анализ вредных факторов	Перечень вредных факторов: – электромагнитное излучение от компьютера – общая система – нормы микроклимата
2. Анализ опасных факторов	Перечень опасных факторов: – электрический ток в электроустановках
3. Охрана окружающей среды:	– анализ воздействия объекта на атмосферу – утилизация компьютерной техники
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС при разработке – возникновение возгорания (пожар) в помещении
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и социальной защиты работников на предприятии:	Организация и соблюдение общих требований охраны труда при работе за ПК. Социальная защита пострадавших на производстве.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	11.03.19
-------------------------------------------------------------	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ71	Кытманов Юрий Александрович		

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности

Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение

Отделение контроля и диагностики

Уровень образования Магистратура

Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2018/2019 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	04.06.2019
------------------------------------------	------------

Дата контроля	Название раздела(модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела
10.11.2018	Обзор литературы и постановка задач	10
10.02.2019	Математическая модель формирования итоговых проекций в системе компьютерной томографии с режимом дуальных энергий с учётом профиля предварительного фильтра излучения	15
10.03.2019	Трансформация проекций в КТ с режимом МДЭ в проекции параметров МДЭ	10
23.04.2019	Выбор профилей предварительных фильтров в КТ с режимом МДЭ для тел вращения из одного материала	15
30.04.2019	Точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера методом КТ с режимом дуальных энергий учётом выравнивающих фильтров с рациональным профилем	15
10.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
12.05.2019	Социальная ответственность	10
14.05.2019	Иностранный язык	10
20.05.2018	Заключение	5

Составил руководитель:

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Федоров Е.М.	к.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 136 с., 13 рис., 26 табл., 64 источника.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, метод дуальных энергий, компьютерная томография.

Объектом исследования является псевдо-монохроматическая реализация метода дуальных энергий в компьютерной томографии.

Предмет исследования – алгоритмы выбора профиля предварительного фильтра в компьютерной томографии с отдельной оценкой распределений плотности и эффективного атомного номера методом дуальных энергий.

Цель работы – усовершенствовать метод дуальных энергий в компьютерной томографии на основе рационального выбора профиля предварительного фильтра излучения.

Рассмотрены особенности псевдо-монохроматических реализаций метода дуальных энергий, предназначенных для одновременной оценки распределений плотности и эффективного атомного номера. Исследован подход к рациональному выбору профилей фильтров рентгеновского излучения для повышения точности оценок распределений плотности и эффективного атомного номера объектов с осевой симметрией. Разработаны и исследованы математические модели, алгоритм и программа для численного моделирования метода дуальных энергий. Методом численного моделирования исследована возможность высокоточной и высокопроизводительной оценки распределений плотности и эффективного атомного номера для осесимметричных объектов контроля.

Степень внедрения: результаты теоретических, методических и экспериментальных исследований использованы для предварительного выбора профиля фильтров применительно к контролю многослойных объектов с осевой симметрией.

Область применения: компьютерная томография с режимом дуальных энергий.

Экономическая эффективность и значимость работы связана с повышением информативной способности компьютерной томографии за счёт применения профилированного фильтра рентгеновского излучения, что приводит к повышению точности оценки распределений плотности и эффективного атомного номера.

Оглавление

Сокращения и обозначения.....	12
Нормативные документы	14
Введение.....	16
1 Обзор литературы и постановка задач.....	26
2 Математическая модель формирования итоговых проекций в системе компьютерной томографии с режимом дуальных энергий с учётом профиля предварительного фильтра излучения	30
2.1 Исходные параметры системы компьютерной томографии с режимом дуальных энергий	30
2.2 Структура систем КТ с режимом дуальных энергий применительно к телам вращения и геометрическая схема формирования единичных проекций.....	32
2.2.1 Структура систем КТ с режимом дуальных энергий	32
2.2.2 Геометрическая схема формирования единичных проекций.....	33
2.3 Конечные характеристики систем компьютерной томографии с режимом дуальных энергий	34
2.4 Предварительная информация по ослаблению гамма-излучения.....	35
2.5 Блок формирования виртуальных (аналоговых) проекций системой компьютерной томографии с режимом дуальных энергий	37
2.6 Блок оцифровки виртуальных (аналоговых) проекций	39
2.7 Зашумление исходных аналоговых (виртуальных) проекций в КТ с режимом МДЭ	40
2.8 Предварительная обработка исходных проекций с трансформацией их в итоговые проекции КТ с режимом МДЭ	42
2.9 Визуализация синограмм в КТ с режимом МДЭ.....	45
3 Трансформация проекций в КТ с режимом МДЭ в проекции параметров МДЭ	47
4 Выбор профилей предварительных фильтров в КТ с режимом дуальных энергий	49

4.1 Выбор профилей предварительных фильтров в КТ с режимом МДЭ для тел вращения из одного материала	49
4.1.1 Цилиндрический объект.....	49
4.1.2 Цилиндрическая труба.....	51
4.2 Адаптивный алгоритм выбора профиля выравнивающих фильтров применительно к контролю многослойных тел вращения методом компьютерной томографии с режимом дуальных энергий	52
5 Точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера методом КТ с режимом дуальных энергий учётом выравнивающих фильтров с рациональным профилем	55
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	59
6.1 Потенциальные потребители результатов исследования	59
6.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	59
6.1.3 SWOT-анализ.....	59
6.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	61
6.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	62
6.2 Организационная структура проекта	63
6.2.1 Определение трудоёмкости выполнения работ	64
6.2.2 Техническая готовность темы.....	66
6.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	67
6.3 Смета затрат на разработку проекта	68
6.3.1 Основная заработная плата исполнителей темы	70
6.3.2 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	72
6.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	72
6.4 Оценка целесообразности исследования	73
6.4.1 Оценка научно-технического уровня следования	73
6.5 Оценка возможных рисков.....	74
6.5.1 Определение ресурсной эффективности	76

7. Социальная ответственность	78
7.1 Производственная безопасность.....	78
7.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	78
7.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	82
7.2.1 Воздействие неионизирующих излучений.....	82
7.2.2 Электрический ток	83
7.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	85
7.2.4 Показатели микроклимата.....	86
7.2.5 Уровень шумов.....	86
7.2.6 Уровень ионизирующего излучения.....	87
7.3 Экологическая безопасность.....	89
7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	90
7.5 Разрушение зданий и/или сооружений	90
7.6 Пожарная безопасность	91
7.7 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	92
7.7.1 Организационные мероприятия.....	92
7.7.2 Организация рабочей зоны	93
7.8 Социальная защита пострадавших на производстве.....	94
7.8.1 Порядок возмещения вреда, причиненного жизни и здоровью граждан	95
7.8.2 Общие основания ответственности за причинение вреда	95
7.8.3 Возмещение причиненного вреда	96
Заключение	97
Список публикаций.....	98
Список использованных источников	99
ПРИЛОЖЕНИЕ А	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	120

Сокращения и обозначения

Сокращения

КТ – компьютерная томография

РВТ – рентгеновская вычислительная томография (синоним КТ)

ОК – объект контроля

ИРИ – источник рентгеновского излучения

ИТИ – источник тормозного излучения

ИМИ – источник моноэнергетического гамма-излучения

РРИ – регистратор рентгеновского излучения

РТИ – регистратор тормозного излучения

РОП – радиационно-оптический преобразователь

РПП – регистратор прямого преобразования

ПР – пространственное разрешение

ЭР – эффективность регистрации

РК – радиационный контраст

ФП – фотопреобразователь (фотоприёмник)

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ОСШ – отношение сигнал/шум

ПК – производительность контроля

МКО – массовый коэффициент ослабления излучения

ЛКО – линейный коэффициент ослабления излучения

МДЭ – метод дуальных энергий

ММЭ – метод мульти-энергий

ПФ – промежуточный фильтр

ППФ – профиль промежуточного фильтра

ЭАН – эффективный атомный номер

РР – радиальное распределение

РРЭАН – радиальное распределение эффективного атомного номера

РРП – радиальное распределение плотности

НРБ – нормы радиационной безопасности

СанПиН – санитарные нормы и правила

Обозначения

E_{max} – максимальная энергия рентгеновского излучения, кэВ

E – энергия рентгеновского (гамма-) фотона

$f(E, E_{max})$ – энергетический спектр рентгеновского излучения

F – фокусное расстояние

k_x – радиационный контраст

SNR – отношение сигнал/шум

ρ – плотность материала

Z – эффективный атомный номер

H – толщина ОК

ρH – массовая толщина ОК

m – МКО материала ОК

μ – ЛКО излучения материалом РОП

r_x – пространственное разрешение

Z_d – эффективный атомный номер РОП или РПП

h_d – толщина РОП или РПП

$\varepsilon(E, h_d)$ – энергетическая зависимость ЭР рентгеновского (тормозного)

излучения

Z_f – эффективный атомный номер материала ПФ

ρ_f – плотность материала ПФ

$h_f(r)$ – РР толщины ПФ (ППФ)

Нормативные документы

1. ГОСТ Р МЭК 61223-3-5-2008 Оценка и контроль эксплуатационных параметров в отделениях лучевой диагностики. Часть 3-5. Приемочные испытания. Оценка эксплуатационных характеристик рентгеновской аппаратуры для компьютерной томографии

2. ГОСТ 17038.–79. Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Метод измерения спектрометрической постоянной фотоэлектронного умножителя, используемого для определения сцинтилляционных параметров детекторов.

3. МЭК 60601-2-44:2001 Медицинские электрические изделия. Часть 2-44. Частные требования безопасности рентгеновского оборудования для компьютерной томографии.

4. МЭК 60522:1999 Определение собственной фильтрации рентгеновского излучателя.

5. МЭК 61267:1994 Медицинская диагностическая рентгеновская аппаратура. Параметры излучения, необходимые для определения характеристик.

6. ИСО 5725-1:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 1. Общие принципы и определения.

7. ИСО 5225-2:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерения.

8. ИСО 5225-3:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 3. Промежуточные измерения точности стандартного метода измерения

9. ИСО 5225-4:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерения.

10. ИСО 5225-6:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 6. Использование на практике точных значений.

11. ГОСТ 18061-90 Толщиномеры радиоизотопные. Общие технические условия.

12. ГОСТ 20337-74 Приборы рентгеновские. Термины и определения.
13. ГОСТ 22091.14-86 Приборы рентгеновские. Метод измерения плотности потока энергии (плотности потока фотонов) рентгеновского излучения.
14. ГОСТ 25113-86 Контроль неразрушающий. Аппараты рентгеновские для промышленной дефектоскопии. Общие технические условия.
15. ISO 15708-1:2017(en) Non-destructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 1: Terminology.
16. ISO 15708-2:2017(en) Non-destructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 2: Principles, equipment and samples.
17. ISO 15708-3:2017(en) Non-destructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 3: Operation and interpretation.
18. ISO 15708-4:2017(en) Non-destructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 4: Qualification.
19. DIN VDI/VDE 2630 BLATT 1.2-2018 Computed tomography in dimensional measurement – Influencing variables on measurement results and recommendations for computed tomography dimensional measurements.
20. DIN 6866-10-1986 Digital methods in diagnostic imaging; X-ray computed tomography; characteristic parameters and evaluation criteria.
30. СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009".

Введение

История радиационных методов контроля началась в 1895 году с открытием Вильгельмом Конрадом Рентгеном таинственных лучей [1–3] и с будоражащих публикаций во всех крупнейших газетах мира теневого изображения руки учёного с обручальным кольцом на пальце. С отмеченного снимка и началось бурное развитие рентгенографии (радиографии). Достижения радиографии применяются во всех отраслях жизнедеятельности человека [4–6]. Наибольшее распространение радиография получила в медицине, промышленности, энергетике, приборостроении, строительстве, транспорте, археологии и палеонтологии. Полученные в радиографии имеют полное название – рентгеновские полутонные «теневые» изображения. Определение теневые связывают с главным недостатком радиографии – с наложением теней структурных фрагментов объекта контроля (ОК) [7, 8]. Указанный недостаток был вскоре замечен учёными и практиками, использующими рентгеновские лучи. Практиков интересовало не только наличие локальной неоднородности на рентгеновском снимке, но и ряд других вопросов, касающихся размеров неоднородности, материала, локализации её по глубине. Всё это явилось побудительным мотивом совершенствования метода радиографии в сторону получения ответов на упомянутые выше вопросы. С 1910 года по 1930 год начала развиваться классическая томография (синонимы: линейная томография (ЛТ); аналоговая томография; линейная ламинография) [9–11]. В этом методе в качестве регистратора рентгеновского излучения (РРИ) в начальный период развития выступала рентгеновская плёнка, а источника фотонов – источник рентгеновского излучения (ИРИ). Метод ЛТ основан на скоординированном перемещении ИРИ и РРИ относительно ОК с ориентацией на некую зону интереса. Изображения локальных неоднородностей в зоне интереса на итоговом радиографическом изображении выглядело существенно более контрастным и резким [12].

Развитие метода ЛТ было приостановлено в связи с поистине эпохальным событием – открытием метода компьютерной томографии (КТ) [10, 11]. Синонимом термина «компьютерная томография» является «рентгеновская вычислительная томография» РВТ. Главным достоинством КТ является возможность получения информации о внутренней структуре ОК. Следует отметить, что КТ базируется на цифровой радиографии (ЦР) и по своей сути является её развитием. Эйфория, связанная с открытием КТ, достаточно быстро закончилась. Это было связано с двумя базовыми моментами. Первый момент – в качестве «скрытого» информационного параметра в КТ выступает линейный (ЛКО) или массовый (МКО) коэффициент ослабления излучения. Определение «скрытый» приводится в связи с широким использованием замены ЛКО – чисел Хаунсфилда. Практиков материаловедов интересует, прежде всего, распределение плотности по сечению ОК. Второй момент связан с влиянием различных физических и технических факторов на качество оценки распределения ЛКО (МКО) [13–15]. Эти факторы приводят к искажениям, называемым артефактами КТ. Каждый артефакт соотносят с названием негативного фактора (немоноэнергетичность, рассеяние, фон, мёртвое время, непрозрачность, и т.п.). Рациональный выбор энергии моноэнергетического источника гамма-излучения либо эффективной энергии рентгеновского излучения с существенным превалированием эффекта Комптона перед другими эффектами взаимодействия гамма-излучения с веществом [16, 17] позволяет оценить распределение плотности по объёму испытываемого объекта.

Одним из первых артефактов, с которым пришлось столкнуться исследователям, использующим метод КТ, стал артефакт немоноэнергетичности (полихроматичности) [18–20], обусловленный существенным отличием непрерывного энергетического спектра рентгеновского излучения от идеальной δ -функции. Из анализа данных по ослаблению гамма-излучения [16, 17, 21] можно сделать вывод о значимости зависимости МКО от энергии фотонного излучения и атомного номера

ослабляющего материала. Это означает, что параметры ослабления рентгеновского излучения существенно отличаются для объектов различной толщины с различной плотностью и эффективным номером материала. Для уменьшения указанного эффекта в научной литературе предлагается несколько подходов: калибровка по ступенчатому или клинообразному тестовому образцу (ТО); предварительная фильтрация рентгеновского излучения с целью его ужесточения (монохроматизации); метод дуальных энергий (МДЭ); метод мульти-энергий; спектрометрический метод. У любого из этих методов можно отметить свои особенности, достоинства, недостатки, ограничения в практическом применении.

Способ калибровки по ступенчатому либо клиновидному образцу прост в реализации, нагляден при интерпретации, отличается высокой производительностью. Главным недостатком способа является отсутствие универсальности, для каждого материала необходим свой тестовый образец.

Это означает, что метод неприменим для разнородных по материалам объектов контроля.

Способ, основанный на использовании фильтрации рентгеновского излучения, базируется на предположении о стремлении к δ -образности энергетического спектра излучения при увеличении толщины объекта контроля. Разумеется, что приблизиться к моно-линии невозможно. В этом случае принято говорить о псевдо-монохроматическом излучении. В результате предварительной фильтрации в энергетическом спектре трансформированного потока будут преобладать более высокоэнергетические фотоны. Упомянутые фотоны называются более жёсткими, соответственно метод фильтрации называется способом ужесточения рентгеновского излучения. Серьёзным недостатком рассматриваемого метода является уменьшение количества рентгеновских фотонов за фильтром, что приводит к увеличению уровня шумов в проекциях. Компенсация уменьшения уровня шумов в проекциях КТ возможна только одним способом – увеличением времени измерений, то есть потерей производительности.

В 70-х – 80-х годах 20 века рядом авторов [22–26] была разработана группа методов компенсации артефакта немоноэнергетичности, который получил название метода дуальных энергий (МДЭ).

Метод дуальных энергий основан на различии зависимостей парциальных МКО, то есть относящихся к составляющим эффектам взаимодействия фотонов с веществом, от энергии и эффективного атомного номера (ЭАН) ослабляющего материала. В МДЭ используется представление полного МКО в виде суммы МКО для двух основных процессов взаимодействия излучения с веществом. Эти процессы конкурируют лишь друг с другом. Отметим, что положение и размер энергетических областей, в которых наблюдается конкуренция процессов взаимодействия гамма-излучения (фотонного излучения) зависит от атомного номера. Так с увеличением эффективного атомного номера область конкуренции фотоэффекта и эффекта Комптона смещается от десятков кэВ для малых значений ЭАН (бор, углерод, алюминий) до первых сотен кэВ (до 300 – 350 кэВ) для больших значений ЭАН (серебро, вольфрам, золото, свинец). Другой парой конкурирующих эффектов являются эффект Комптона и эффект рождения пар. Он характерен высокоэнергетического гамма-излучения (фотонного излучения) – от 3 МэВ до 9 МэВ, причём вклад эффекта рождения пар в общий процесс взаимодействия фотонного излучения с веществом значителен для материалов с высоким уровнем ЭАН. Отметим, что для энергий в диапазоне от 350 кэВ до 1,5 – 3 МэВ метод дуальных энергий не может быть реализован. Существуют две реализации МДЭ – с одной максимальной энергией и с двумя энергиями. В первом случае информация о преимущественно мягкой и преимущественно жёсткой составляющих рентгеновского излучения формируется сэндвич-детектором с двумя РЧО, разделёнными дополнительным металлическим фильтром [27–29]. Метод, основанный на сканировании ОК пучками рентгеновского излучения с различными максимальными энергиями [28], является классическим МДЭ. Для всех реализаций МДЭ формируется информация об ослаблении мягкого (Low Energy) и жёсткого (High Energy) рентгеновского излучения, которая позволяет

оценить два параметра МДЭ. Для определённости первый параметр соотносят с эффектом Комптона, а второй параметр – с фотоэффектом для максимальных энергий рентгеновского излучения до 350 кэВ и с эффектом рождения пар для максимальных энергий, превышающих 1,022 МэВ. Параметр, относящийся к эффекту Комптона, практически не зависит от атомного номера материала и может быть приравнен к произведению плотности материала ОК на толщину. Этот параметр называют массовой толщиной, массовой плотностью или поверхностной плотностью и измеряют в г/см². Параметр МДЭ, связанный с фотоэффектом или с эффектом рождения пар равен произведению массовой толщины на степень ЭАН. Для фотоэффекта теоретическое значение степени равно 4, а экспериментальное – от 2,8 до 3,5. Для эффекта рождения пар теоретическое и экспериментальное значения степени близки к единице.

Достоинством любой из реализаций МДЭ связано с возможностью оценки не только массовой толщины ОК, но и ЭАН. Недостатки связаны с дополнительными временными и материальными затратами на процесс получения необходимой информации, а также со значительным интервалом изменения максимальных энергий рентгеновского излучения, для которого МДЭ является физически нереализуемым.

В настоящее время в связи с появлением высокоэффективных спектрометрических детекторов реализация КТ, основанная на оценке энергетического спектра, переживает период бурного развития. Следует заметить, что для таких реализаций КТ доступна одновременная оценка массовой толщины и ЭАН. Использование импульсных ИРИ или ИТИ с высокой интенсивностью и спектрометрических РРИ или РТИ технически сложно. Ещё один недостаток связан с многократным возрастанием объёма информации и необходимостью в высокопроизводительных вычислительных системах и в специальных комплексах программ для интерпретации полученных результатов. Помимо этого, стоимость матричных спектрометрических детекторов многократно выше аналогичных по площади интегральных детекторов. Метод компьютерной томографии совместно с

режимом МДЭ позволяет оценить пространственные распределения плотности и ЭАН. Такое расширение КТ привело к существенному увеличению задач контроля, которые ранее считались физически или технически нереализуемыми.

В работе [30] подчёркнута необходимость в высокопроизводительных средствах для обработки информации в различных реализациях МДЭ, ММЭ и спектрометрических методах. Классические реализации МДЭ отличаются сложностью применяемых алгоритмов и требуют больших вычислительных затрат для обработки информации. Наиболее просты алгоритмы для монохроматической (δ -функция) реализации метода дуальных энергий, но ограничен выбор энергий радиоизотопных источников гамма-излучения, значителен размер их фокусных пятен, и необходимо соблюдение жёстких требований НРБ и СанПиН.

Выше отмечено, что фильтрация первичного потока рентгеновского (тормозного) излучения позволяет считать трансформированный ИРИ (ИТИ) псевдо-монохроматическим источником фотонного излучения, то есть достаточно близким к δ -функции (моно-линия). При использовании пластинчатых фильтров существенно уменьшается производительность контроля [30]. Предполагается, что использование профильных фильтров в КТ с режимом дуальных энергий также будет эффективно с точки зрения производительности, как и в случае применения профилированных фильтров для классических реализаций компьютерной томографии [31]. Дополнительным бонусом является высокая точность оценки пространственных распределений плотности и эффективного атомного номера без практической потери производительности.

Из сказанного выше следует доказанной актуальность темы выпускной квалификационной работы, цели и задач для её реализации.

Объект исследований – псевдо-монохроматическая реализация метода дуальных энергий в компьютерной томографии.

Предмет диссертационных исследований – алгоритмы выбора профиля предварительного фильтра в компьютерной томографии с отдельной оценкой распределений плотности и эффективного атомного номера методом дуальных энергий.

Цель исследований – усовершенствовать метод дуальных энергий в компьютерной томографии на основе рационального выбора профиля предварительного фильтра излучения.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

– Провести краткий анализ информационных источников, касающихся вопросов выбора профиля предварительного фильтра рентгеновского излучения в компьютерной томографии, в том числе и для режима дуальных энергий.

– Разработать математическую модель формирования исходных проекций в методе дуальных энергий с учётом профиля предварительного фильтра излучения.

– Разработать математическую модель трансформации исходных проекций в проекции метода дуальных энергий.

– Предложить рекомендации по выбору профиля толщин предварительных фильтров для комплексного использования методов дуальных энергий и компьютерной томографии.

– Разработать алгоритм и программу для его реализации для численного моделирования оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии в режиме дуальных энергий применительно к неоднородным объектам с осевой симметрией с учётом профиля предварительного фильтра.

– Исследовать влияние профиля предварительного фильтра на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера для типичных многослойных объектов с осевой симметрией.

– Доказать отсутствие заметного ухудшения производительности контроля в случае применения выравнивающих фильтров.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались следующие методы: вычислений; математического и численного моделирования; системного анализа, управления и обработки информации; планирования численных и натуральных экспериментов; статистической обработки результатов экспериментов, включая линейный и нелинейный регрессионный анализ.

Научная новизна:

– Проведен анализ подходов к выбору профиля предварительного фильтра рентгеновского излучения в компьютерной томографии для режима дуальных энергий.

– Разработана математическая модель формирования исходных проекций в методе дуальных энергий с учётом профиля предварительного фильтра излучения.

– Разработана математическая модель трансформации исходных проекций в проекции метода дуальных энергий.

– Предложены рекомендации по выбору профиля и материалов предварительных фильтров для комплексного использования методов дуальных энергий, и компьютерной томографии.

– Доказано отсутствие ухудшения производительности контроля.

– Разработан алгоритм и программа для его реализации для численного моделирования оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии в режиме дуальных энергий применительно к неоднородным объектам с осевой симметрией с учётом профиля предварительного фильтра.

– Исследовано и проиллюстрировано влияние профиля предварительного фильтра на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера для типичных многослойных объектов с осевой симметрией.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в результате проведенных исследований рекомендации по выбору профиля и материала предварительного фильтра рентгеновского излучения в совокупности с алгоритмом обработки информации позволяют повысить точность оценки радиальных распределений плотности и эффективного атомного номера объектов с осевой симметрией без значимой потери производительности контроля.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований реализованы в рекомендациях по выбору профиля и материалов предварительного фильтра рентгеновского излучения, а также в алгоритме и реализующей его программе вычислительных экспериментов по оценке радиальных распределений плотности и эффективного атомного номера объектов с осевой симметрией с учётом предварительной фильтрации излучения.

Апробация работы. Основные положения выпускной квалификационной работы обсуждались на конференции «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее, Томск, 2017», на отчетах по НИР отделения контроля и диагностики ИШ НКБ в 2017 – 2019 годах.

Публикации. По результатам исследований опубликованы тезисы доклада на конференции и статья в журнале NDT & E International.

На защиту выносятся:

- Результаты анализа подходов к выбору профиля предварительного фильтра рентгеновского излучения в компьютерной томографии для режима дуальных энергий.
- Математическая модель формирования исходных проекций в методе дуальных энергий с учётом профиля предварительного фильтра излучения.
- Математическая модель трансформации исходных проекций в проекции метода дуальных энергий.

– Рекомендации по выбору профиля и материалов предварительных фильтров для комплексного использования методов дуальных энергий, и компьютерной томографии.

– Обоснование отсутствия заметного ухудшения производительности контроля в компьютерной томографии с режимом дуальных энергий в случае применения выравнивающих фильтров.

– Алгоритм и программа его реализующая для численного моделирования оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии в режиме дуальных энергий применительно к неоднородным объектам с осевой симметрией с учётом профиля предварительного фильтра.

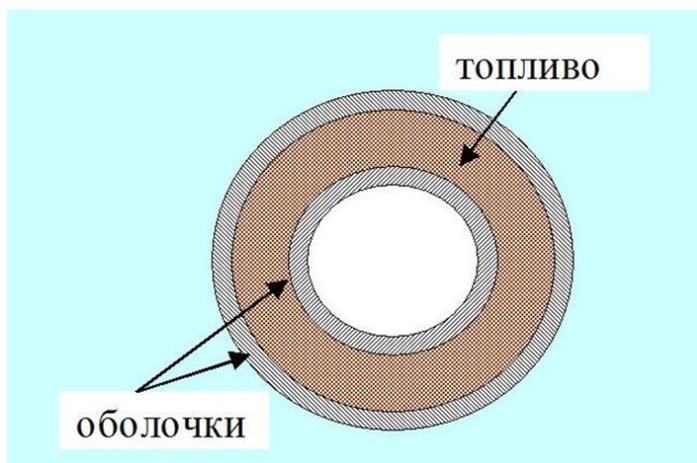
– Иллюстрации влияния профиля предварительного фильтра на точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера для типичных многослойных объектов с осевой симметрией.

1 Обзор литературы и постановка задач

Широкое использование методов компьютерной томографии и реализующих их технических средств сдерживается рядом обстоятельств, среди которых особо выделяется значимость искажений, вносимых в реконструированные изображения сечений объектов контроля, различными физическими факторами [31–33]. Применение ИРИ и ИТИ в КТ обуславливает артефакт немоноэнергетичности, приводящий к существенному смещению оценок плотности. Исследования, связанные с этим артефактом, продолжают быть актуальными, чему свидетельство работы [34–36]. Выше отмечено, что применение предварительной фильтрации рентгеновского и тормозного излучений снижает уровень искажений в реконструированных изображениях внутренней структуры ОК. Помимо этого, применение фильтров приводит к сужению диапазонов изменения аналоговых сигналов, что особенно актуально при недостаточной разрядности аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в классических реализациях КТ и в реализациях, дополненных МДЭ [37].

Для компенсации артефакта немоноэнергетичности в медицинских КТ на ранних стадиях развития метода для выравнивания сигнала по полю изображения применяли компенсаторы из воды [38]. Для различных отраслей промышленности, транспорта характерны объекты с выраженными кольцевыми структурами, материалы которых отличаются по плотности и эффективному атомному номеру. Изображения таких объектов приведены на рисунке 1. Примерами таких объектов являются трубы, цилиндрические ТВЭЛы, артиллерийские снаряды, коаксиальные кабели, литиевые батарейки, медицинские импланты и т.п.

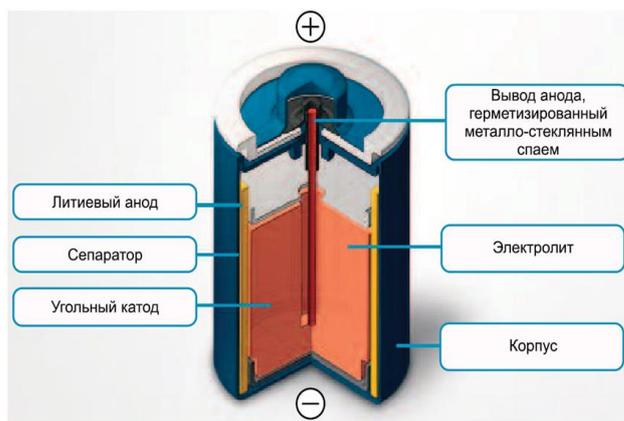
Исследователя структуры подобных объектов интересуют не только внутренние области слоёв и центра, но и границы перехода. Именно границы перехода искажаются в КТ наиболее значительно, что связано с алгоритмами реконструкции и резким изменением жёсткости рентгеновского (тормозного) излучения на упомянутых границах переходов.



Кольцевые ТВЭЛ



Коаксиальный кабель



Литиевые батарейки



Стальные трубы в ППУ изоляции в защитной полиэтиленовой оболочке

Рисунок 1 – Примеры тел вращения – перспективных объектов контроля

Жёсткость рентгеновского (тормозного) излучения напрямую связана с эффективной энергией излучения. Излучение является более жёстким, если его эффективная энергия выше. Жёсткое излучение имеет более высокое значение проникающей способности. В работе [39] рассмотрены вопросы, связанные с выбором профиля предварительного (выравнивающего) фильтра для повышения точности оценки радиального распределения плотности для осесимметричных объектов с выраженными кольцевыми структурами. Для реконструкции изображений в [39] использовалось обратное преобразование Абеля (инверсия Абеля) [40–42], которое продолжает широко применяться в КТ. Востребованность обратного преобразования Абеля обусловила исследования по его совершенствованию [43–45].

В работе [30] продемонстрирована эффективность превращения источников рентгеновского излучения в МДЭ в источники псевдомонохроматического излучения. Указанное превращение достигается ужесточением потоков рентгеновского излучения с максимальными энергиями E_L и E_H с помощью предварительных фильтров толщинами h_L и h_H .

Алгоритм определения параметров МДЭ A и B , рассмотренный в [30], базируется на следующем. Для фиксированных максимальных энергий рентгеновского излучения E_L и E_H соответствующие потоки фильтруются пластинами толщиной h_L и h_H . В результате сканирований формируются проекции Y_L и Y_H . Здесь проекции Y_L и Y_H представляют собой распределения толщин ОК в длинах свободного пробега (д.с.п.) для E_L и E_H . Измеренные (экспериментальные) значения радиационных толщин Y_L и Y_H связывает с параметрами МДЭ A и B система двух линейных уравнений (линейная регрессия без смещений)

$$\begin{aligned} A &= Y_L a_{22} + Y_H a_{12} \\ B &= Y_L a_{21} + Y_H a_{11} \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты линейной регрессии (1) a_{ij} , $i=1..2$, $j=1..2$ имеют строгую физическую трактовку. Эти коэффициенты теоретически определяются энергетическими зависимостями сечений фотоэффекта и эффекта Комптона для рентгеновского излучения с максимальной энергией до 350 кэВ и энергетическими зависимостями сечений эффекта Комптона и эффекта рождения пар для максимальных энергий тормозного излучения с максимальной энергией свыше 1,022 МэВ.

На практике коэффициенты линейной регрессии a_{ij} , $i=1..2$, $j=1..2$ находятся на стадии калибровочных измерений в результате сканирования специальным образом организованного тестового объекта, состоящего из фрагментов, массовая толщина которых ρH и ЭАН Z пробегают всю область потребительского интереса.

Предложенный в работе [30] способ отличается простотой в реализации и исключительной наглядностью, что оправдывает его применение, несмотря

на высокую плату, выражающуюся в снижении производительности контроля, обусловленном уменьшением потока информативных фотонов. Приведённый в работе критерий выбора толщин предварительных фильтров связан не только с точностью оценки радиальных распределений плотности и эффективного атомного номера, но и с допустимым для потребителя уровнем ухудшения производительности контроля.

Предполагается перспективным объединение подходов из работ [30] и [39], так как выбор профиля выравнивающего фильтра согласно [39] предполагает выравнивание аналогового сигнала (аналоговых сигналов в МДЭ) во всём диапазоне изменения толщин ОК в д.с.п. Это означает, что не существует необходимости в дополнительной фильтрации потока рентгеновских фотонов и без того уже отфильтрованных фрагментом ОК большой толщины.

Для проверки возможности объединения подходов нужно разработать краткие, но полноценные математические модели: формирования исходных проекций в МДЭ с учётом фильтрации низких и высоких энергий фильтрами с переменным профилем; трансформации исходных проекций в проекции метода дуальных энергий. Необходима также разработка рекомендаций по выбору профилей фильтров и разработка алгоритма и программы численного моделирования для оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии в режиме дуальных энергий применительно к неоднородным объектам с осевой симметрией с учётом профиля предварительного фильтра.

2 Математическая модель формирования итоговых проекций в системе компьютерной томографии с режимом дуальных энергий с учётом профиля предварительного фильтра излучения

Ниже приведём описание структуры математической модели формирования исходных проекций в системе компьютерной томографии с режимом дуальных энергий с учётом профиля предварительного фильтра излучения применительно к контролю объектов с осевой симметрией. Используем модель плоского моно-направленного источника рентгеновского (тормозного) излучения. На практике такая модель достигается в том случае, если расстояния от ИРИ (ИТИ) до ОК и РРИ (РТИ) значительны по сравнению с размером регистратора излучения. По своей структуре разрабатываемая математическая модель состоит из нескольких зависимых друг от друга блоков. Опишем эти блоки подробно.

2.1 Исходные параметры системы компьютерной томографии с режимом дуальных энергий

К исходным данным системы КТ с МДЭ относятся: параметры источника излучения (ИРИ, ИТИ); форма, внутренняя структура, материалы (плотности и эффективные номера материалов) и размеры объекта контроля; материал и размеры элементарных чувствительных объёмов радиационных преобразователей (РОП, РПП); поперечные размеры элементарного фотооптического преобразователя (ФП) и разрядность АЦП. Здесь определение «элементарный» соотносится с формированием одной точки проекции. В случае применения регистраторов прямого преобразования в качестве элементарного ФП выступает элемент РПП.

Для определённости свяжем координату x с линейным детектором, а нулевую точку с центром линейного детектора.

Источники рентгеновского (тормозного) излучения характеризуют следующие параметры:

– $E_L, E_H, E_L < E_H$, – максимальные энергии рентгеновского (тормозного) излучения;

– $f(E, E_L), f(E, E_H)$ – исходные числовые энергетические спектры (плотность распределения случайной величины энергии E) источника рентгеновского (тормозного) излучения;

– n_{L0}, n_{H0} – загрузки элементарного радиометрического детектора (канала), то есть число фотонов, падающих на лобовые поверхности единичного детектора за времена регистрации t_L, t_H ;

– $Z_f, \rho_f, h_f(x)$ – эффективный атомный номер, плотность материала и распределение толщины (профиль) предварительного фильтра по координате x .

Выше отмечено, что введение предварительной фильтрации на практике приводит к ужесточению энергетического спектра. Ужесточение энергетического спектра способствует уменьшению систематической погрешности в КТ, в МДЭ и КТ с МДЭ, обусловленной полихроматическим характером энергетического спектра излучения, а при расчётах – к повышению точности вычисления интегралов по энергиям в разрабатываемой математической модели системы КТ с режимом дуальных энергий.

Осесимметричный объект контроля (ОК), в данном случае его одно сечение, как элемент системы описывается рядом параметров:

– размером R полутени ОК на линейку детекторов, в рассматриваемом случае совпадает с текущим радиусом сечения ОК;

– радиальными распределениями плотности $\rho(r), |r| \leq R$ материала ОК и эффективного атомного номера $Z(r)$.

Для многослойных объектов наиболее важными параметрами ОК являются: количество слоёв; толщины слоёв; плотности и эффективные атомные номера материалов.

Отметим, что максимальная толщина ОК H_{\max} в направлении распространения рентгеновского излучения равна $D=2R$.

Системы регистрации рентгеновского излучения характеризует следующий ряд параметров:

– вид детекторов, который определяется наличием или отсутствием оптической и (или) радиационной связи элементарных чувствительных объёмов радиационно-оптических преобразователей;

– Z_d , ρ_d , h_d – эффективный атомный номер, плотность материала радиационно-оптического преобразователя и толщина его единичного объёма;

– $a \times b$ – поперечные размеры элементарного ФОП (элементарного РПП), второй размер совпадает с толщиной сечения ОК;

– l – разрядность АЦП;

– L – половина длины линейного детектора (регистратора), $L > R$, половина физического размера проекции

Размеры проекции в пикселях M связаны с поперечным размером элементарного ФОП (РПП) и физическим размером проекции L простейшим соотношением

$$M = L/a. \quad (2)$$

2.2 Структура систем КТ с режимом дуальных энергий применительно к телам вращения и геометрическая схема формирования единичных проекций

2.2.1 Структура систем КТ с режимом дуальных энергий

Существует несколько различных реализаций систем компьютерной томографии с режимом дуальных энергий. Эти реализации связаны с поколением КТ. Режим дуальных энергий позволяет оценивать распределения плотности и ЭАН. Для снижения влияния рассеяния на качество КТ применяют щелевую коллимацию ИРИ (ИТИ) и (или) РРИ (РТИ). При необходимости оценки ПРП и ПРЭАН щелевой пучок перемещается относительно ОК. В рассматриваемой реализации КТ объект сканируется дважды – пучками рентгеновского (тормозного) излучения с максимальными энергиями E_L и E_H .

Системы КТ с режимом МДЭ состоят из ИРИ (ИТИ) с коллиматором и переключаемыми уровнями максимальной энергии, объекта контроля, вращающегося стола с возможностью его вертикального перемещения с

высокоточным позиционированием, РРИ (РТИ) с коллиматором, алгоритма и программы захвата проекций и управления вращением и поступательным перемещением, алгоритма и программы трансформации исходных проекций в проекции МДЭ, алгоритма и программы реконструкции КТ, алгоритма оценки пространственных распределений плотности и эффективного атомного номера, калибровочных образцов и методических рекомендаций по осуществлению всех необходимых калибровок.

2.2.2 Геометрическая схема формирования единичных проекций

На рисунке 2 приведена геометрическая схема формирования единичных проекций в КТ с режимом дуальных энергий применительно к телам вращения. В качестве ОК выступает толстостенная труба.

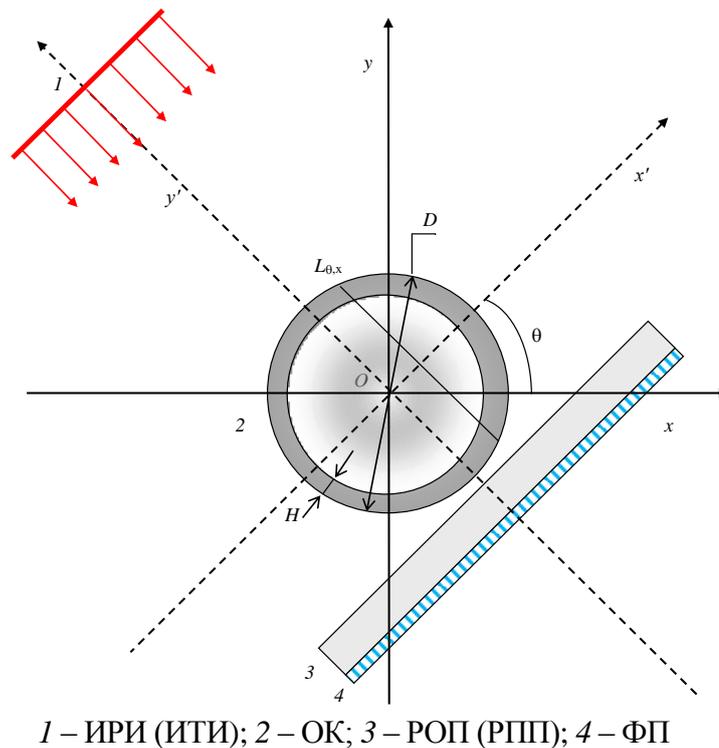


Рисунок 2 – Схема формирования проекций в КТ

Формирование единичных проекций в КТ абсолютно аналогично формированию строк исходных цифровых радиографических изображений в СЦР с МДЭ. Отличие заключается в том, что в КТ для оценки внутренней структуры по сечению ОК необходимо значительное количество ракурсов. Здесь под внутренней структурой понимается распределения информативного параметра по объёму ОК, в качестве которого может выступать, например,

плотность ρ . Для описания всей совокупности проекций, необходимой для восстановления распределения плотности ρ по сечению ОК, вводятся две системы координат: неподвижная система координат XOY и подвижная система координат $X'OY'$. Текущее положение подвижной системы координат относительно неподвижной характеризуется углом поворота θ . В классической реализации КТ угол θ изменяется от 0 до 180 °.

Неподвижная и подвижная системы координат связаны друг с другом простейшими соотношениями

$$\begin{aligned}x' &= x \cos \theta + y \sin \theta \\y' &= -x \sin \theta + y \cos \theta\end{aligned}\tag{3}$$

2.3 Конечные характеристики систем компьютерной томографии с режимом дуальных энергий

Основные потребительские характеристики систем компьютерной томографии с режимом дуальных энергий:

Δ_ρ – абсолютная погрешность оценки радиального распределения плотности материала ОК;

Δ_Z – абсолютная погрешность оценки радиального распределения эффективного атомного номера ОК;

T – время формирования необходимой совокупности проекций.

Потребители систем КТ с МДЭ выдвигают ограничительные требования к характеристикам

$$\Delta_\rho < \Delta_{\rho \text{ lim}}, \Delta_Z < \Delta_{Z \text{ lim}}, T < T_{\text{lim}}.\tag{4}$$

В ограничительных условиях (4) индекс «lim» указывает на потребительские требования.

Отметим, что предельные значения $\Delta_{\rho \text{ lim}}$ и $\Delta_{Z \text{ lim}}$ можно назвать разрешением по плотности и разрешением по эффективному атомному номеру.

2.4 Предварительная информация по ослаблению гамма-излучения

К предварительной информации по ослаблению гамма-излучения веществами относится ряд энергетических зависимостей. В доступных библиотеках по ослаблению гамма-излучения веществом [16, 17, 21, 46] приводится информация, которую зачастую сложно использовать для непосредственного численного моделирования проекций КТ с режимом МДЭ.

На первом этапе вычисляются таблицы зависимости МКО излучения от энергии для материалов слоёв. Особенностью испытуемого объекта является различие слоёв по плотности и эффективному атомному номеру материалов. Материал каждого слоя, в свою очередь, может состоять из одного или нескольких химических веществ. В первом случае материал слоя испытуемого объекта является химическим веществом, и он образован из нескольких химических элементов. Пусть Z_1, Z_2, \dots, Z_n и M_1, M_2, \dots, M_n атомные номера и молярные массы соответствующих химических элементов, а $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – соответствующие количества атомов в молекуле; ρ – плотность материала. В этом случае формула связи массовых коэффициентов ослабления излучения материалом слоя ОК m и сечений взаимодействия гамма-излучения с веществом σ имеет следующий вид

$$m_i = \frac{\sum_{k=1}^n \sigma_{ki} N_A \alpha_k}{\sum_{k=1}^n \alpha_k M_k}, \quad (5)$$

здесь индекс i соответствует энергии E_i – таблицы энергий.

Во втором случае материал слоя состоит из нескольких химических веществ. Вначале вычисляется таблица массовых коэффициентов ослабления гамма-излучения для всех веществ $m_{ji}, j=1 \dots n$, а затем формируется таблица для конечного материала

$$m_i = \sum_{j=1}^n m_{ji} w_j \quad (6)$$

здесь w_j – массовая доля j -го вещества.

На вход второго этапа блока предварительной информации по ослаблению гамма-излучения поступает таблицы МКО (E_i, m_i) для материалов всех слоёв ОК и таблицы МКО для материалов фильтра m_{fi} , контролируемого объекта m_{TO} и материала детектора m_d . Второй этап предназначен для построения интерполяций энергетических зависимостей МКО материалов фильтра $m_f(E)$, ОК $m_{TO}(E)$ и детектора $m_d(E)$. Для интерполяции может быть использована сплайн-интерполяция. Вначале вычисляются коэффициенты интерполяции для всех необходимых зависимостей, а затем задаются все интерполяционные зависимости. Данный этап необходим для быстрой и точной оценки МКО для любой энергии E фотонов.

К третьему этапу блока предварительной информации относится аналитическое описание числовых энергетических спектров ИРИ (ИТИ) $f(E, E_L)$, $f(E, E_H)$. Напомним, что в соответствии с определением энергетического спектра источника излучения

$$\int_0^{E_L} f(E, E_L) dE = 1, \int_0^{E_H} f(E, E_H) dE = 1. \quad (7)$$

Для описания спектров $f(E, E_L)$, $f(E, E_H)$ для области максимальных энергий ИРИ до 450 кэВ традиционно используют формулу Крамерса [47], а области максимальных энергий ИТИ свыше 1,022 МэВ применяют формулу Шиффа [48] или её обобщения, или экспериментальные аппроксимации [49]. Отметим, что в настоящее время остаётся актуальным вопрос с точной оценкой энергетических спектров высокоинтенсивных и импульсных ИРИ и ИТИ. Появление на рынке научного оборудования высокопроизводительных панельных и матричных спектрометрических РРИ на основе прямого преобразования излучения [50], вероятно, снизит остроту этой проблемы, но возможность применения указанных регистраторов для ИТИ всё ещё остаётся под большим вопросом.

2.5 Блок формирования виртуальных (аналоговых) проекций системой компьютерной томографии с режимом дуальных энергий

Основным приложением систем КТ продолжает оставаться визуализация внутренней структуры сложного объекта. В этом направлении выделяют индустриальные приложения, например, контроль сборки и приложения, связанные с обеспечением экономической, транспортной и национальной безопасности, например, рентгеновский досмотровый контроль. Дополнение КТ режимом дуальных энергий существенно расширяет возможности метода за счёт отдельной оценки пространственных распределений плотности и ЭАН.

Отметим, что сложность алгоритмов имитационного моделирования проекций применительно к системам КТ в целом и систем КТ с режимом дуальных энергий определяется сложностью пространственной структуры самого ОК.

Здесь и ниже индекс L будет соответствовать меньшей максимальной энергии ИРИ (ИТИ) в МДЭ, а индекс H – большей максимальной энергии. Виртуальные (аналоговые) проекции $\mathbf{P}_{L,H}$ формируются из дискретных наборов $\mathbf{I}_{L,H}$, которые представляет собой дискретные одномерные распределения яркости светового излучения на входе системы ФП для комбинированного РРИ (РТИ) или распределения электрического сигнала для РПП. Для удобства свяжем номер пикселя i дискретных наборов $\mathbf{I}_{L,H}$ с осью x . Вся энергия светового излучения, попадающая на площадку с размерами $a \times b$, ассоциируется с центральной точкой этого прямоугольника. Ось z совпадает с направлением распространения рентгеновского излучения. Напомним о том, что нас интересует общая энергия и общее количество фотонов, падающих на фронтальную поверхность единичного детектора.

При описании процесса формирования множеств $\mathbf{I}_{L,H}$ исходят из логичного допущения о пропорциональности энергии светового излучения поглощённой энергии рентгеновского излучения (пропорциональности электрического заряда поглощённой энергии рентгеновского излучения). С

учётом этого допущения яркости (амплитуды) аналоговых сигналов $I_{L,Hi}$ в точке с координатой i оцениваются по формуле

$$I_{L,Hi} = C_{L,H} \left(n_{0L,H} \int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-Y(E,x)} k_f(E, x) \varepsilon(E, h_d) dE + ds_{L,H} \right), \quad (8)$$

где $C_{L,H}$ – коэффициенты преобразования поглощённой энергии в световую (электрическую) энергию для максимальных энергий ИРИ (ИТИ) E_L и E_H ;

E_{\min} – минимальное значение энергии (параметр для расчётов, на практике принимают $E_{\min}=10$ кэВ);

$E_{ab}(E, h_d)$ – среднее значение энергии зарегистрированного фотона;

$ds_{L,H}$ – энергетические эквиваленты темновых сигналов (выключенный источник излучения).

Строго говоря, $E_{ab}(E, h_d)$ зависит и от поперечных размеров элементарного объёма РОП (РПП).

В формуле (8) функция $k_f(E, x)$ представляет собой дополнительный коэффициент ослабления рентгеновского (тормозного) излучения профилированным фильтром

$$k_f(E, x) = e^{-m(E, Z_f(x)) \rho_f h_f(x)}. \quad (9)$$

Величина $Y(E, x)$ в формуле (8) представляет собой толщину ОК в д.с.п. для фотонного излучения с энергией E по лучу L_x , соединяющему точечный источник рентгеновского излучения с точкой детектора с координатой x

$$Y(E, x) = \int_{L_x} m(E, Z(x, h)) \rho(x, h) dh, \quad (10)$$

здесь $Z(x, h)$, $\rho(x, h)$ – распределения ЭАН и плотности материала ОК по указанному выше лучу. Координата h совпадает с координатой z .

На рисунке 3 приведена иллюстрация (копия из программы, написанной в системе для математических вычислений MathCad) изменения числового энергетического спектра рентгеновского излучения $f(E_{\max}, E_f, h_f)$ для $E_{\max}=225$ кэВ в зависимости от толщины вольфрамового фильтра h_f , здесь E_f – энергия фотонов. Толщину фильтра из вольфрама h_f изменяли от 0 до 1 мм.

Из анализа графиков, приведённых на рисунке 3, можно сделать два вывода. Первый – с увеличением толщины ослабляющего фильтра h_f происходит явное ужесточение рентгеновского спектра. Второе – вольфрамовый фильтр инициирует характеристическое излучение K_α серии с энергией около 60кэВ.

Следует отметить, что для источника излучения с энергетическим спектром, близким к δ -функции (радионуклид с одной энергетической линией), $Y(E,x)$, $-L \leq x \leq L$, и есть единичная проекция в КТ.

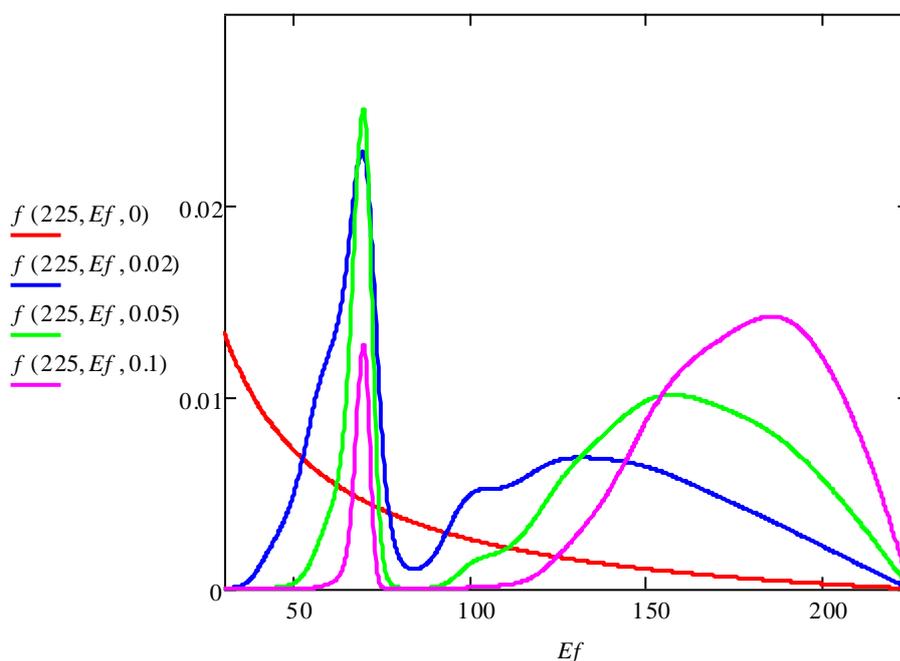


Рисунок 3 – Числовый энергетический спектр рентгеновского излучения $f(E_{\max}, E_f, h_f)$

2.6 Блок оцифровки виртуальных (аналоговых) проекций

На первом этапе блока оценивается интервал Δ_1 , эквивалентный цифровой единице (интервал дискретизации). Этот интервал одинаков для Low Energy и для High Energy при регистрации излучения на одну линейку детекторов и может быть различен при регистрации излучения на две линейки детекторов.

Очевидно, что аналоговые сигналы $I_{L,H}$ максимальны в случае отсутствия ОК, поэтому формула вычисления указанного интервала имеет вид

$$\Delta_1 = \frac{C_1}{2^l - 1} \times \max \left(C_L n_{0L} \int_{E_{\min}}^{E_L} f(E, E_L) E_{ab}(E) \varepsilon(E) dE, C_H n_{0H} \int_{E_{\min}}^{E_H} f(E, E_H) E_{ab}(E) \varepsilon(E) dE \right). \quad (11)$$

Формула (11) справедлива для предварительного фильтра с минимальной толщиной в профиле, близкой к нулю.

Коэффициент C_1 , $C_1 > 1$, вводится для предотвращения возможного превышения цифровым сигналом значения $2^l - 1$.

Оцифровка совокупностей виртуальных аналоговых сигналов $\mathbf{I}_{L,H}$ и превращения их в совокупности цифровых сигналов $\mathbf{D}_{L,H}$ сводится к элементарному преобразованию

$$D_{L,Hi} = \left[\frac{I_{L,Hi}}{\Delta_1} \right], \quad (12)$$

где $[\arg]$ – целая часть \arg .

2.7 Зашумление исходных аналоговых (виртуальных) проекций в КТ с режимом МДЭ

Известно, что к шумам в проекциях в КТ приводят флуктуации исходного потока фотонов ИРИ (ИТИ), случайный характер процессов взаимодействия и регистрации первичных и вторичных фотонов с материалом ОК и РОП (РПП). В ряде случаев существенны шумы темновых сигналов каналов РРИ (РТИ). Особенностью КТ с режимом МДЭ является различие уровней шумов в проекциях для Law Energy и для High Energy.

Для численного моделирования аналоговых (виртуальных) проекций, близких к реальным проекциям, на совокупность виртуальных аналоговых сигналов $\mathbf{I}_{L,H}$ накладываются аддитивные шумы [51], зависящие от флуктуаций числа фотонов и поглощённой в детекторах энергии и шумов темновых сигналов с детекторов РРИ (РТИ). Элементы зашумлённых аналоговых (виртуальных) проекций для Law Energy и для High Energy $\mathbf{I}_{L,H}^*$ описываются обобщённым выражением

$$I_{L,Hi}^* = I_{L,Hi} + ns_{L,Hi}. \quad (13)$$

Все элементы совокупностей слагаемых в выражении (13) представляют собой независимые случайные величины.

Распределения СВ $n_{L,H i}$ близки к нормальным распределениям с параметрами $\overline{n_{L,H i}}$, $\sigma n_{L,H i}$. Отмеченные параметры анализируемых случайных величин определяются флуктуациями числа зарегистрированных фотонов и их поглощённой энергии [51]. Для розыгрыша анализируемых СВ хорошо зарекомендовал метод обратных функций. Пусть СВ $n_{L,H i}$ характеризуются средними значениями и среднеквадратическими отклонениями $\overline{n_{L,H i}}$, $\sigma n_{L,H i}$, тогда розыгрыш СВ происходит по сценарию, описываемому выражениями следующего вида

$$n_{L,H i} = \xi_N \sigma n_{L,H i} + \overline{n_{L,H i}}, \quad (14)$$

здесь ξ_N – единичное значение случайной величины, распределённой по закону Гаусса с нулевым средним и единичным среднеквадратическим отклонением. Все современные языки программирования и системы для математических вычислений имеют функции для розыгрыша СВ, распределённых по нормальному закону.

Точный учёт влияния поперечных размеров элементарных чувствительных объёмов – РОП или РПП на уровни шумов является затратным по времени процессом, поэтому аналоговые (виртуальные) сигналы $I_{L,H i}$ можно считать нормальными случайными величинами со средними значениями $\overline{I_{L,H i}}$ и среднеквадратическими отклонениями $\sigma_{L,H i}$, которые вычисляются с помощью выражений

$$\sigma_{L,H i} = C_{L,H} n_{0L,H} \int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}^2(E, h_d) e^{-Y(E,x)} \varepsilon(E, h_d) dE. \quad (15)$$

Допущение о нормальности функций распределения аналоговых (виртуальных) сигналов $I_{L,H i}$ является вполне обоснованным, так как эти сигналы равны сумме большого числа одинаково распределённых случайных величин (поглощённых энергий).

Случайные аналоговые (виртуальные) сигналы $I_{L,H i}$ могут быть численно смоделированы с помощью выражения, аналогичного (14), но с заменой параметров

$$I_{L,H i} = \xi_N \sigma_{L,H i} + \overline{I_{L,H i}}. \quad (16)$$

Зашумлённые аналоговые (виртуальные) сигналы $I_{L,H i}$ подвергаются оцифровке (12) и отправляются на блок предварительной обработки исходных проекций КТ с МДЭ с последующей их трансформацией в истинные (итоговые) проекции КТ с режимом МДЭ.

Отметим, что качество КТ существенным образом зависит от шумов исходной информации, особенно критичны к шумам реализации КТ с режимом дуальных энергий.

2.8 Предварительная обработка исходных проекций с трансформацией их в итоговые проекции КТ с режимом МДЭ

На этапе предварительной обработки исходных проекций производится две базовых калибровки и одно нелинейное преобразование, без которых невозможно осуществить качественную реконструкцию. К базовым калибровкам относятся калибровки по «чёрному» и по «белому». Все цифровые сигналы делятся на три группы: темновые сигналы (ТС); сигналы при ослаблении излучения воздухом; измерительные сигналы. Калибровка по «чёрному» состоит из двух этапов. На первом этапе вычисляются выборочные средние $D_{f i}$ ТС для всех детекторов. На втором – из всех цифровых сигналов, включая измерения по воздуху и за ОК, вычитаются соответствующие значения $D_{f i}$. Процедура калибровки по «белому» предназначена для устранения различия коэффициентов передачи энергии для всех элементарных детекторов РРИ (РТИ). Она сводится к вычислению отношения измерительных цифровых сигналов D_{i} , откалиброванных по «чёрному», к средним значениям откалиброванных по «чёрному» сигналов по воздуху $D_{a i}$. Калибровка по «белому» позволяет оценить коэффициент ослабления рентгеновского (тормозного) излучения. Нелинейное преобразование, указанное выше,

сводится к логарифмированию откалиброванных по «белому» сигналов. На выходе получается оценки толщин ОК по соответствующему лучу в д.с.п для максимальных энергий РРИ (РТИ) $E_{L,H}$. Совокупность таких оценок по линейке детекторов РРИ (РТИ) и будет представлять проекции для Low Energy и для High Energy $Y_{L,H}$

Описанный выше набор процедур первичной обработки исходных проекций и трансформации их в итоговые проекции КТ с режимом МДЭ сводится к преобразованиям

$$Y_{L,H i} = -\ln \frac{D_{L,H i} - \overline{D_{L,H f i}}}{D_{L,H a i} - \overline{D_{D,L f i}}}. \quad (17)$$

Множества $Y_{L,H}$ являются итоговыми проекциями КТ с режимом МДЭ.

На рисунке 4 приведены итоговые проекции КТ с режимом дуальных энергий $Y_L(r)$ и $Y_H(r)$ для условий примера из [30] и максимальных энергий $E_L=100$ кэВ и $E_H=225$ кэВ. Объект контроля является слоёным цилиндром со слоями из углерода, алюминия, меди и железа.

На рисунке 5 приведены оценки радиальных распределений плотности $\rho n(r)$ и эффективного атомного номера $Zn(r)$ материала рассматриваемого объекта контроля.

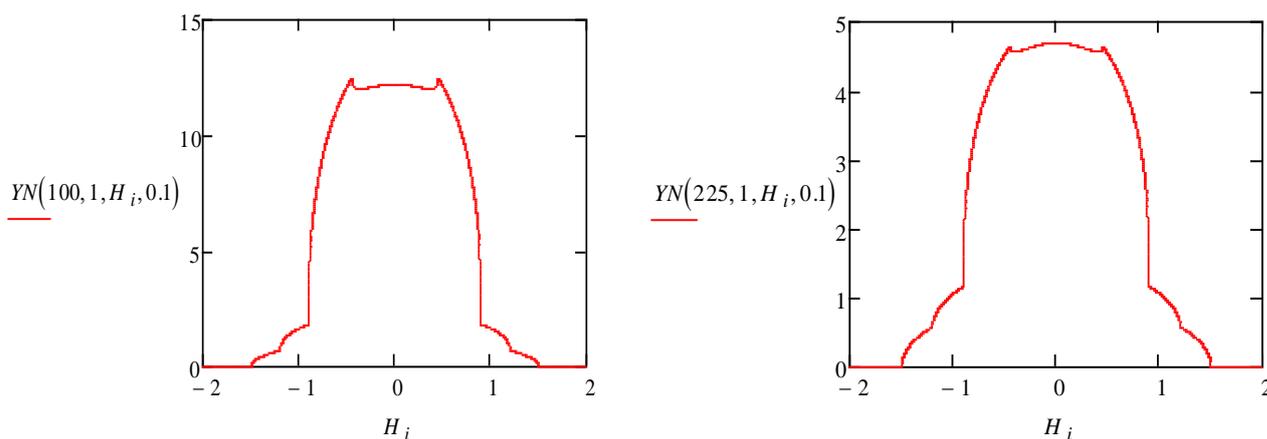


Рисунок 4 – Итоговые проекции КТ с режимом дуальных энергий $Y_L(r)$ и $Y_H(r)$ для рассматриваемого ОК

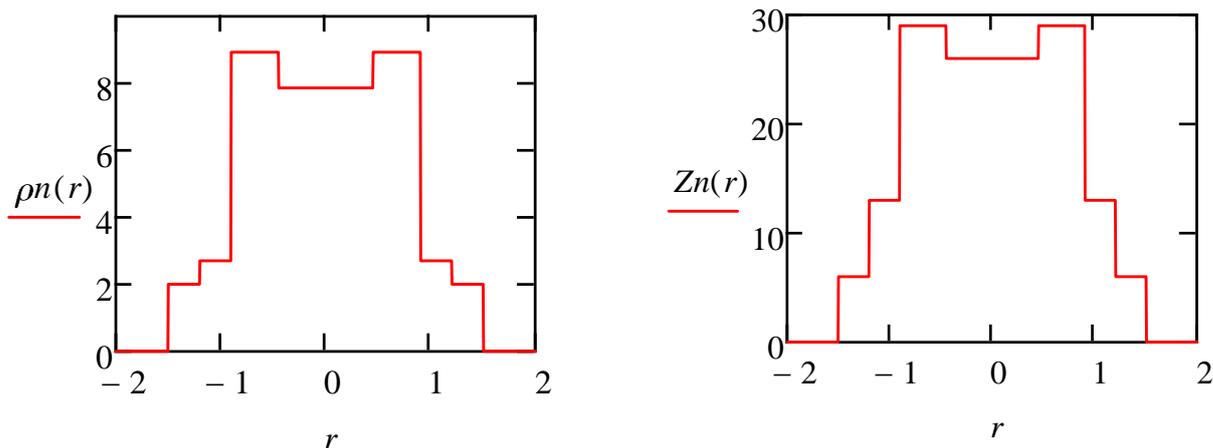


Рисунок 5 – Радиальные распределения плотности $\rho n(r)$ и эффективного атомного номера $Zn(r)$ рассматриваемого ОК

Из сопоставления данных, приведённых на рисунках 4 и 5 можно сделать вывод о том, что радиальное распределение плотности ОК $\rho n(r)$ существенно влияет на обе проекции $Y_L(r)$ и $Y_H(r)$, а радиальное распределение эффективного атомного номера $Zn(r)$ более значимо влияет на проекцию $Y_L(r)$, что обусловлено большим вкладом фотоэффекта в МКО для рентгеновского излучения с максимальной энергией E_L по сравнению с рентгеновским излучением с максимальной энергией E_H .

Отметим недостаточную корректность максимальных энергий рентгеновского излучения $E_L=100$ кэВ и $E_H=225$ кэВ, так как размеры анализируемого объекта в д.с.п. для меньшей энергии превышает значение 6, что приводит к чрезвычайно малым значениям цифровых сигналов за таким объектом. С другой стороны, излишнее повышение уровня меньшей энергии может привести к ухудшению качества оценки радиального распределения эффективного атомного номера.

Совокупность всех проекций \mathbf{SY} , полученных для всех ракурсов θ_j , в КТ называется синограммой $\mathbf{SY}=\cup \mathbf{Y}_j$. Синограммы $\mathbf{SY}_{L,H}$ до визуализации продолжает оставаться виртуальной.

В ряде случаев её полезно визуализировать для обнаружения возможных недочётов сканирования. Применительно к рассматриваемому объекту

контроля таким недочётом может быть, например, отклонение центра симметрии ОК от центра вращения рабочего стола.

2.9 Визуализация синограмм в КТ с режимом МДЭ

Процесс превращения «виртуальных» синограмм в цифровые полутоновые изображения называют визуализацией.

Визуализация синограмм $\mathbf{SY}_{L,H}$ сводится к трансформации соответствующих матриц в целочисленные матрицы полутонов $\mathbf{P}_{L,H}$.

Выражение для отмеченной трансформации имеет вид

$$P_{L,H \ ij} = \left[\frac{SY_{L,H \ ij} - SY_{L,H-}}{SY_{L,H+} - SY_{L,H-}} \times P_{\max} \right]. \quad (18)$$

здесь параметры $SY_{L,H\pm}$ регулируют контраст, а P_{\max} – максимальную яркость (не более 255). В предельном случае

$$SY_{L,H-} = \min(\mathbf{SY}_{L,H}) \text{ и } SY_{L,H+} = \max(\mathbf{SY}_{L,H}). \quad (19)$$

Как и выше, квадратные скобки в (18) означают целую часть.

Изображение (18) негативное, то есть более прозрачный для фотонов фрагмент объекта будет выглядеть светлым и наоборот. При необходимости негативные изображения (18) элементарным преобразованием трансформируются в позитивные изображения.

На рисунке 6 приведена типичная синограмма цилиндрического объекта (негатив) с шаровидными порами или включениями. Каждое включение характеризуется: угловыми координатами; радиусами центров; радиусами включений; плотностью материалов включений и объекта.

Следует отметить, что синограммы тел вращения при совпадении оси вращения с осью ОК совпадают с радиографическим изображением ОК.



Рисунок 6 – Синограмма цилиндрического объекта (негатив) с шаровидными порами и включениями

3 Трансформация проекций в КТ с режимом МДЭ в проекции параметров МДЭ

Существует множество подходов к определению параметров МДЭ A , B по измеренным экспериментальным оценкам Y_L , Y_H толщин ОК в д.с.п. для максимальных энергий ИРИ (ИТИ) E_L и E_H . В [52] предложен высокоэффективный, высокоточный и производительный алгоритм оценки параметров МДЭ. Алгоритм основан на применении двумерных обратных функций и требует специализированных тестовых объектов для определения соответствующих калибровочных функций. Отметим, что этот алгоритм выходит за рамки теории Альвареса и Маковски, которую можно характеризовать выражением – «две энергии – два процесса – два параметра МДЭ». В алгоритме [52] исключается средняя часть упомянутого выше выражения. Алгоритм оценки параметров МДЭ [30], базирующийся на предварительной фильтрации рентгеновского (тормозного) излучения основан на применении системы (1) с предварительным определением всего четырёх калибровочных коэффициентов и выглядит более привлекательным для практического применения. Недостатком алгоритма является значимое снижение производительности контроля.

В первом разделе было сделано предположение об эффективности применения предварительных фильтров с переменным профилем, причём без значимой потери производительности контроля.

Выше подчёркнуто, что применение предварительной фильтрации позволяет считать трансформированное рентгеновское (тормозное) излучение псевдо-монохроматическим, то есть энергетический спектр излучения будет близок к δ -функции. Ниже приведём тезисное описание метода.

Пусть формирование исходных проекций разнесено по времени. В этой ситуации для E_L и E_H предполагается рациональным использование фильтров с различными профилями $h_{fL}(x)$ и $h_{fH}(x)$. Перепишем уравнение (1) в виде,

удобном для анализа подхода к получению калибровочных коэффициентов a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} на основе просвечивания тестового объекта (ТО).

$$\begin{cases} \tilde{A} = Y_L(\rho H, Z)a_{22} + Y_H(\rho H, Z)a_{12} \\ \tilde{B} = Y_L(\rho H, Z)a_{21} + Y_H(\rho H, Z)a_{11} \\ A = \rho H \\ B = AZ^\beta \end{cases} \quad (20)$$

Значения коэффициента β и калибровочных коэффициентов a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} определяются из условия приравнивания истинных значений параметров МДЭ и их оценок по результатам обработки вычислительных или натуральных экспериментов методом наименьших квадратов.

Формулы (1)–(20) пригодны для численного моделирования исходных проекций ОК в КТ с МДЭ и преобразования их в итоговые проекции, а трансформация итоговых проекций в проекции метода МДЭ (A , B) осуществляется с помощью уравнения (1) на основе определённых экспериментально калибровочных коэффициентов a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} и β .

На рисунке 7 для иллюстрации приведены проекции параметров МДЭ $A(r)$ и $B(r)$, полученные из итоговых проекций КТ с режимом дуальных энергий $Y_L(r)$ и $Y_H(r)$ для условий примера, описанного выше.

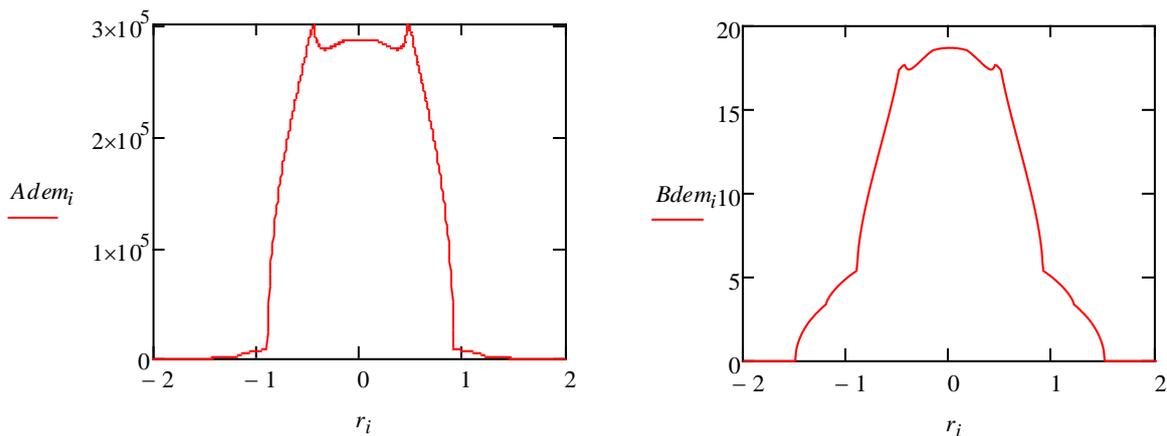


Рисунок 7 – Проекция параметров МДЭ $A(x)$ и $B(x)$ для рассматриваемого ОК

Отметим, что причудливость проекций параметров МДЭ $A(r)$ и $B(r)$ существенным образом влияет на качество реконструкции РРП и РРЭАН.

4 Выбор профилей предварительных фильтров в КТ с режимом дуальных энергий

При выборе профилей фильтров в системах компьютерной томографии, функционирующих в режиме дуальных энергий, будем придерживаться подхода, изложенного в работе [39], но с корректировкой применительно к рассматриваемым объектам контроля.

Из анализа научной литературы следует, что подобрать универсальные профили предварительного фильтра не представляется возможным, поэтому будем рассматривать вопросы выбора применительно к рассматриваемому классу объектов контроля – объектам с осевой симметрией. Эти объекты являются телами вращения. При рассмотрении вопросов выбора профилей предварительных фильтров будем придерживаться традиционного подхода – «от простого к сложному».

4.1 Выбор профилей предварительных фильтров в КТ с режимом МДЭ для тел вращения из одного материала

4.1.1 Цилиндрический объект

Пусть фильтр изготавливается из материала с одной плотностью и одним эффективным атомным номером. Для цилиндрических объектов выражение (7) может быть записано без учёта темновых сигналов при условии попадания координаты x в тень ОК, то есть $-R \leq x \leq R$,

$$I_{L,H_i}(x) = C_{L,H} n_{0L,H} \int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-2m(E,Z)\rho\sqrt{R^2-x^2}} e^{-m(E,Z_f)\rho_f h_{L,H_f}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE. \quad (21)$$

Выражение (21) недостаточно удобно для выбора профилей предварительных фильтров, так как зависит от потока частиц и от коэффициента передачи энергии. Оценки толщин ОК $\tilde{Y}_{L,H_i}(x)$ в д.с.п. свободны от этих параметров, поэтому они являются более приспособленными для отмеченного выбора. Соответствующее выражение для вычисления $\tilde{Y}_{L,H_i}(x)$ имеет вид

$$\tilde{Y}_{L,H i}(x) = -\ln \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-2m(E,Z)\rho\sqrt{R^2-x^2}} e^{-m(E,Z_f)\rho_f h_{L,H f}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-m(E,Z_f)\rho_f h_{L,H f}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE}. \quad (22)$$

Очевидно, что для рассматриваемого ОК оценки $\tilde{Y}_{L,H i}(x)$ достигают максимальных значений $\tilde{Y}_{L,H \max}$ в точке $x=0$

$$\tilde{Y}_{L,H \max} = -\ln \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-2m(E,Z)\rho R} e^{-m(E,Z_f)\rho_f h_{L,H f}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-m(E,Z_f)\rho_f h_{L,H f}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE}. \quad (21)$$

Очевидно, что в отмеченной точке толщина ОК является максимальной, и излучение за этой толщиной максимально жёсткое, то есть нет необходимости делать его ещё более жёстким. Отсюда следует, что $h_{L,H f}(0) \approx 0$. Знак приблизительного равенства обусловлен технологичностью изготовления неразрывных фильтров. Отсюда следует

$$\tilde{Y}_{L,H \max} = -\ln \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-2m(E,Z)\rho R} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) \varepsilon(E, h_d) dE}. \quad (22)$$

В качестве условия выбора профилей фильтров может быть использовано отсутствие заметного различия профиля толщин ОК в д.с.п. Это означает, что уравнения для нахождения профилей фильтров $h_{L,H f}(x)$ имеют вид

$$-\ln \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-2m(E,Z)\rho\sqrt{R^2-x^2}} e^{-m(E,Z_f)\rho_f h_{L,H f}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-m(E,Z_f)\rho_f h_{L,H f}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE} = \tilde{Y}_{L,H \max}. \quad (23)$$

Очевидно, что самые простые и удобные решения уравнений (23) относительно профилей $h_{L,H f}(x)$ получается в том случае, если предварительные фильтры изготавливаются из материала ОК

$$h_{L,Hf}(x) = 2R - 2\sqrt{R^2 - x^2}. \quad (24)$$

Для такого случая профили фильтров будут одинаковы и для меньшей, и для большей максимальных энергий рентгеновского (тормозного) излучений.

4.1.2 Цилиндрическая труба

Для цилиндрических труб плотность не равна нулю, если $R_1 \leq |x| \leq R$. В этом случае подход к выбору профилей предварительных фильтров $h_{L,Hf}(x)$ остаётся прежним. Изменяются выражения для вычисления $\tilde{Y}_{L,H \max}$ и положение этого максимума. Положение максимума в точке $x=R_1$. Значение $\tilde{Y}_{L,H \max}$ находится по формуле

$$\tilde{Y}_{L,H \max} = -\ln \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-2m(E,Z)\rho\sqrt{R^2-R_1^2}} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) \varepsilon(E, h_d) dE}. \quad (25)$$

Уравнения для нахождения профилей будут иметь вид

$$-\ln \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-2m(E,Z)\rho F(R,R_1,x)} e^{-m(E,Z_f)\rho_f h_{L,Hf}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{L,H}} f(E, E_{L,H}) E_{ab}(E, h_d) e^{-m(E,Z_f)\rho_f h_{L,Hf}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE} = \tilde{Y}_{L,H \max}. \quad (26)$$

В уравнениях (25) функция $F(R, R_1, x)$ описывается выражением

$$F(R, R_1, x) = \begin{cases} \sqrt{R^2 - x^2}, & R_1 \leq |x| \leq R \\ \sqrt{R^2 - x^2} - \sqrt{R_1^2 - x^2}, & 0 \leq |x| < R_1 \\ 0, & R < |x| \leq L \end{cases} \quad (27)$$

Сравнение и анализ уравнений (23), (27) позволяет обосновать общий подход к выбору профилей предварительных фильтров $h_{L,Hf}(x)$.

Заметим, что из вышесказанного следует допустимость и справедливость использования термина «предварительный фильтр» одновременно с термином «выравнивающий фильтр».

Ниже обсудим общий подход к выбору профилей выравнивающих фильтров для многослойных тел вращения, слои которых могут отличаться и по плотности материала, и по его эффективному атомному номеру.

Особую значимость такому подходу придаёт возможность построения профилей фильтров, основываясь на экспериментальном определении единичной проекции исследуемого объекта. Эта особенность даёт право назвать алгоритм выбора профилей выравнивающих фильтров адаптивным.

4.2 Адаптивный алгоритм выбора профиля выравнивающих фильтров применительно к контролю многослойных тел вращения методом компьютерной томографии с режимом дуальных энергий

Пусть объект контроля представляет собой многослойное (n слоёв) тело вращения. Внутренняя структура объекта характеризуется тремя наборами чисел: радиусами внешних границ слоёв (R_1, R_2, \dots, R_n) , $R_1 < R_2 < \dots < R_n$; плотностями и эффективными атомными номерами материалов слоёв $(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$, (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) . Для описания функции $Y(E, x)$ можно воспользоваться выражением (8) либо способом замещения объёмов, начиная с внешнего слоя. Но в этом нет необходимости, так как может быть предложено описание алгоритма выбора профиля выравнивающих фильтров применительно к контролю многослойных тел вращения методом компьютерной томографии с режимом дуальных энергий в максимально обобщённом виде.

Пусть в процессе натурального или вычислительного эксперимента получены проекции испытуемого объекта контроля $\tilde{Y}_{L,Hi}(x)$. Несмотря на особенность испытуемого ОК, связанную с осевой симметрией и определяющую близость проекций \mathbf{Y}_{Lj} для любого из ракурсов j (то же самое можно сказать и о проекциях \mathbf{Y}_{Hj}), в анализ для уменьшения уровня шумов могут быть вовлечены и все проекции. На первом этапе находятся максимальные значения проекций $\tilde{\mathbf{Y}}_L - \tilde{Y}_{L_{\max}}$ и $\tilde{\mathbf{Y}}_H - \tilde{Y}_{H_{\max}}$ соответственно. На втором этапе решаются уравнения относительно профилей $h_{Lj}(x)$ и $h_{Hj}(x)$

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{L_{\max}} - Y_L(x) &= \frac{\int_{E_{\min}}^{E_L} f(E, E_L) E_{\text{ab}}(E, h_d) e^{-m(E, Z_f) \rho_f h_{L_f}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_L} f(E, E_{L,H}) E_{\text{ab}}(E, h_d) \varepsilon(E, h_d) dE} \\ \tilde{Y}_{H_{\max}} - Y_H(x) &= \frac{\int_{E_{\min}}^{E_H} f(E, E_H) E_{\text{ab}}(E, h_d) e^{-m(E, Z_f) \rho_f h_{H_f}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_H} f(E, E_H) E_{\text{ab}}(E, h_d) \varepsilon(E, h_d) dE} \end{aligned} \quad (28)$$

Экспериментальное определение профилей выравнивающих фильтров $h_{L_f}(x)$ и $h_{H_f}(x)$ для заданного ЭАН материала фильтра Z_f базируется на предварительных калибровочных измерениях (вычислениях) зависимостей толщин фильтров в д.с.п. от их массовых толщин $Y_L(\rho_f h_f)$ и $Y_H(\rho_f h_f)$ для максимальных энергий рентгеновского (тормозного) излучения E_L и E_H .

Итоговые уравнения для нахождения профилей $h_{L_f}(x)$ и $h_{H_f}(x)$ в этом случае будут иметь вид

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{L_{\max}} - Y_L(x) &= Y_L(\rho_f h_{L_f}) \\ \tilde{Y}_{H_{\max}} - Y_H(x) &= Y_H(\rho_f h_{H_f}) \end{aligned} \quad (29)$$

Система (28) позволяет определить профили выравнивающих фильтров для сколь угодно сложных по своей внутренней структуре тел вращения. Достоинством рассмотренного обобщенного подхода к выбору профилей компенсирующих фильтров в КТ с режимом дуальных энергий является его применимость для рентгеновского и тормозного излучения и допустимость произвола в выборе материалов фильтров.

Следует отметить серьёзное ограничение метода выравнивающих фильтров, связанное с ограничением применимости плоских (панельных) РРИ (РТИ) в случае испытаний объектов из сильно-рассеивающих материалов. Впрочем, это же ограничение выдвигается и для классических реализаций КТ. Использование систем КТ в качестве измерительных средств, а не средств визуализации, обуславливает необходимость щелевой коллимации ИРИ (ИТИ) и (или) щелевой или (микрочанальной) коллимации РРИ (РТИ).

На рисунке 8 для иллюстрации приведены профили медных выравнивающих фильтров $h_{Lf}(x)$ и $h_{Hf}(x)$ в мм для условий примера, описанного выше, координата x также в мм.

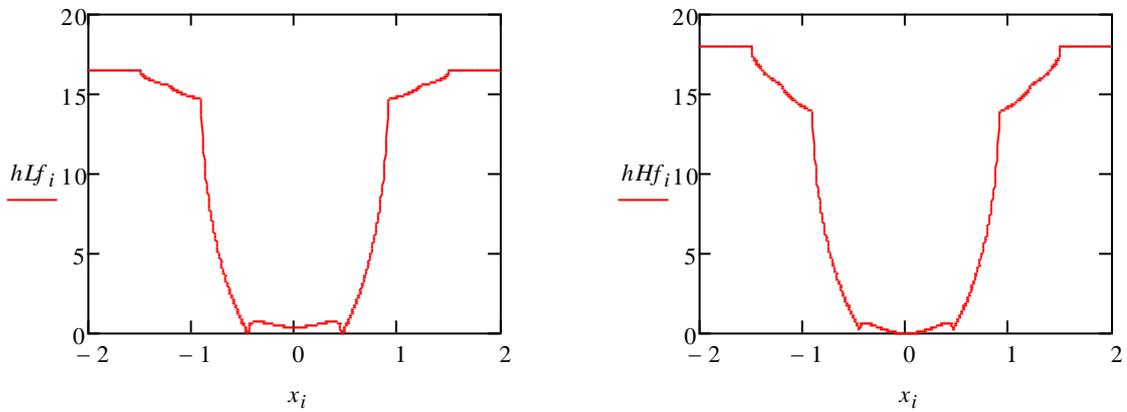


Рисунок 8 – Профили медных выравнивающих фильтров $h_{Lf}(x)$ и $h_{Hf}(x)$ для рассматриваемого объекта контроля

При внимательном рассмотрении графиков, характеризующих фильтры $h_{Lf}(x)$ и $h_{Hf}(x)$, можно выделить их значительные различия в границах перехода от одного материала ОК к другому материалу.

5 Точность оценок распределений плотности и эффективного атомного номера методом КТ с режимом дуальных энергий учётом выравнивающих фильтров с рациональным профилем

Основными потребительскими характеристиками рассматриваемой реализации компьютерной томографии применительно к анализируемому типу объектов контроля являются радиальные распределения плотности $\rho(r)$ и эффективного атомного номера $Z(r)$.

Оценим качество определения радиальных распределений плотности $\rho(r)$ и эффективного атомного номера $Z(r)$ для неоднородных тел вращения. двух классов объектов с осевой симметрией. В качестве примера будет рассмотрен пример ОК из работы [30]. Это позволит сравнить эффективность применения выравнивающих фильтров с рациональным профилем в КТ с режимом МДЭ и пластинчатых фильтров для тех же систем КТ. Здесь под эффективностью понимается сочетание трёх параметров – точностей оценок радиальных распределений плотности, эффективного атомного номера и производительности контроля.

Как выше уже было подчёркнуто, что для иллюстрации эффективности применения выравнивающей фильтрации в КТ с режимом дуальных энергий был рассмотрен пример объекта из работы [30]. В качестве примера был выбран достаточно сложный объект – цилиндр из четырёх слоёв с вариацией плотности и эффективного атомного номера материалов слоёв.

Опишем испытуемый объект контроля подробнее. 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 $7,86$ г/см³. Максимальные энергии рентгеновского излучения $E_L=100$ кэВ, $E_H=225$ кэВ. Толщины медных пластин для предварительной фильтрации рентгеновского излучения – $h_L=4$ мм и $h_H=10$ мм. Профили выравнивающих фильтров $h_L f(x)$ и

$h_H f(x)$ выбирались в соответствии с рекомендациями, предложенными выше. Эти профили приведены на рисунке 8.

На рисунке 9 приведены для сравнения результаты оценки радиальных распределений плотности $\rho(r)$ и эффективного атомного номера $Z(r)$ для предложенного объекта для случаев использования предварительной фильтрации пластинчатыми фильтрами и выравнивающей фильтрации с профилированными фильтрами.

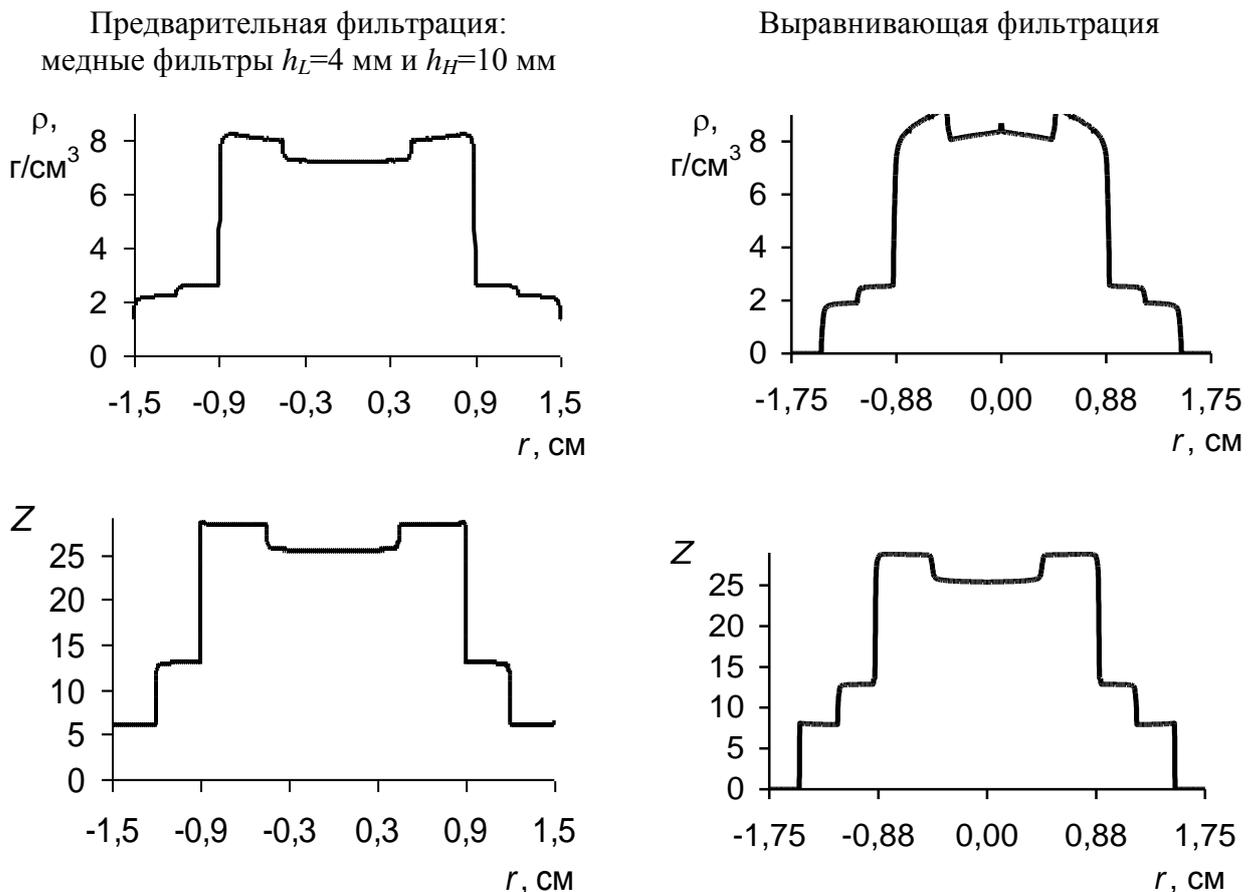


Рисунок 9 – Оценки радиальных распределений плотности $\rho(r)$ и эффективного атомного номера $Z(r)$ для многослойного цилиндрического объекта для предварительной и выравнивающей фильтрации в компьютерной томографии с режимом дуальных энергий

Из анализа данных, приведённых на рисунке 9, можно сделать вывод о сопоставимых уровнях качества оценки радиальных распределений плотности и эффективного атомного номера для рассматриваемых объектов для сравниваемых реализаций метода компьютерной томографии с режимом

дуальных энергий. Производительность контроля в рассматриваемых системах КТ не ухудшается по сравнению с удвоенным сканированием ОК. В случае использования выравнивающих фильтров производительность контроля в несколько раз выше по сравнению с реализацией КТ, использующей предварительную фильтрацию рентгеновского (тормозного) излучения пластинчатыми фильтрами.

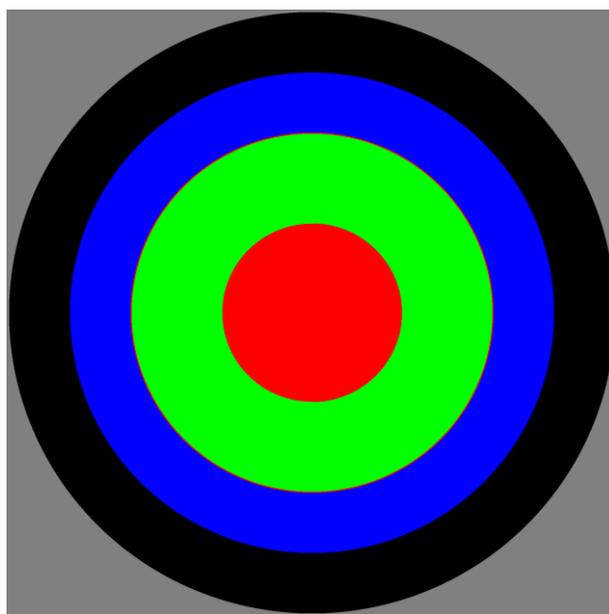
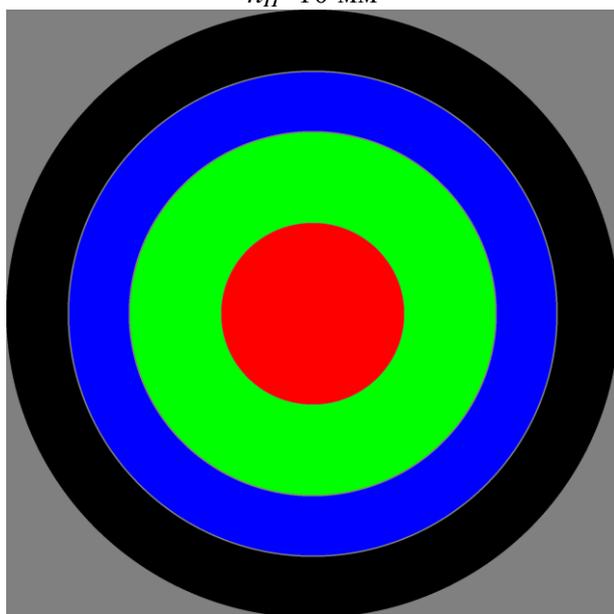
На рисунке 10 приведены иллюстрации, которые позволяют сравнить качество идентификации материалов по ЭАН применительно к сложному телу вращения, контролируемому методом КТ с режимом дуальных энергий с предварительной и выравнивающей фильтрацией рентгеновского излучения. Следует отметить, что в том и другом случае максимальное расхождение истинных значений и оценок ЭАН Z не превысило по абсолютной величине 0,8 единиц эффективного атомного номера. Исключение составляет оценка ЭАН для углерода. Возможно, что это связано с определением коэффициентов линейной регрессии (1) для условного монохроматического источника гамма-излучения с энергией, равной эффективной энергии. Более значительные отклонения наблюдаются на границах разделов материалов. Эти отклонения особенно значительны для радиальных распределений плотности, что возможно связано с несовершенством используемой калибровки и недостаточно эффективной реализацией алгоритма обратного преобразования Абея. Справедливости ради следует отметить, что для всех алгоритмов реконструкции изображений в КТ характерны существенные отклонения для границ разделов между фрагментами, отличающимися по плотности и (или) эффективному атомному номеру.

Анализ результатов численного эксперимента доказывает эффективность применения выравнивающей фильтрации в компьютерной томографии с режимом дуальных энергий для оценки радиальных распределений плотности и, особенно, радиальных распределений эффективного атомного номера. Выбор профилей выравнивающих фильтров основывается на выравнивании диапазонов изменения радиальных

распределений аналоговых сигналов для меньшей и большей максимальных энергий рентгеновского излучения. Использование выравнивающих фильтров в КТ с режимом дуальных энергий не приводит к ухудшению производительности контроля.

Предварительные медные фильтры $h_L=4$ мм и $h_H=10$ мм

Выравнивающая фильтрация



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

Рисунок 10 – Идентификация материалов многослойного цилиндрического объекта в компьютерной томографии методом дуальных энергий:

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

6.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Целевой рынок – рынок, обеспечивающий для фирмы основную долю от общего результата ее деятельности. Целевой рынок выбирается в результате исследования возможных рынков сбыта той или иной продукции или услуги, характеризующийся минимальными расходами на маркетинг и обеспечение продаж. Именно целевая аудитория определяет целевой рынок.

Сегмент рынка – это маркетинговое понятие, подразумевающее группу людей, выбранных по определенным признакам и критериям, и выдающих сходную реакцию на определенный товар, выпущенный на рынок.

Потенциальными потребителями готового результата исследования являются различные государственные органы пограничная служба, таможня, промышленные организации, научно-производственные объединения и научно-исследовательские институты.

6.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

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

6.1.3 SWOT-анализ

С целью исследования внешней и внутренней среды проекта применен SWOT–анализ. Прежде чем составить матрицу SWOT требуется выявить сильные и слабые стороны, а также возможности и угрозы проекта с которыми возможно столкнуться.

В таблице 1 SWOT-анализ научно-исследовательской работы (НИР) с выделением слабых и сильных сторон применительно к угрозам и возможностям при взаимодействии с внешней средой.

Таблица 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 Сл3. 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. В таблицах 2–5 отмечены сильные и слабые стороны проекта.

Таблица 2 – Сильные стороны проекта

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

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

Таблица 3 – Слабые стороны проекта

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

Таблица 4 – Сильные стороны проекта

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

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

Таблица 5 – Слабые стороны проекта

		Сл1	Сл2	Сл3
Возможности проекта	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 касается 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 НИИ актуальны для предприятий, занимающихся дефектоскопией, рентгенографией, томографией.

6.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 6 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определён имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	4
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	2
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	1	1
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	4
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1

Продолжение таблицы 6

10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выход на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Проработан механизм реализации научного проекта	2	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	32	36

Вывод: По результатам оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации можно сделать вывод, что на данный момент перспективность проекта средняя. Это связано с тем, что проект не носит коммерческий характер, а уровень компетенций разработчика в области коммерциализации не достаточен. Исправить данную ситуацию можно путём привлечения специалистов из области коммерциализации.

6.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Время продвижения товара на рынок зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Для данного научно-исследовательского проекта целесообразнее использовать такие методы коммерциализации, как инжиниринг и организация собственного предприятия. Это связано с тем, что оба метода позволят получать постоянный доход с разработки, а инжиниринг, в дополнение, будет способствовать её совершенствованию.

6.2 Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте.

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 7:

Таблица 7 – 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.

6.2.1 Определение трудоемкости выполнения работ

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

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{мин}i} + 2t_{\text{мин}i}}{5} \quad (30)$$

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

$t_{\text{мин}i}$ – 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:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (31)$$

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

$t_{ожi}$ – 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:

$$T_{ki} = T_{pi}k \quad (32)$$

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:

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (33)$$

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:

$$k = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48. \quad (34).$$

6.2.2 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:

$$Y_i = \frac{T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (35)$$

где Y_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:

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{i=1} T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (36)$$

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

Таблица 8 – Временные показатели проведения НИР

№ раб.	Исполнители	Продолжительность работ				
		t _{min} чел- дн.	t _{max} чел-дн	t _{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

6.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

Таблица 9 – 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 радиогрaфии	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.

6.3 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:

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх.}} + I_{\text{прочие}} \quad (37)$$

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов, оборудования 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.

В таблице 10 приведены материальные затраты.

Таблица 10 – 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

$$I_{ам.обор} = \left(\frac{T_{исп.обор}}{365} \right) \times K_{обор} \times H_a, \quad (38)$$

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

365 дней – количество дней в году;

$K_{обор}$ – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{с.с.обор}}, \quad (39)$$

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

$$I_{ам.аппар.} = \left(\frac{T_{исп.аппар.}}{365} \right) \cdot K_{аппар.} \cdot H_a = \left(\frac{6}{365} \right) \cdot 10000000 \cdot \frac{1}{10} = 16000 \quad (40)$$

$$I_{ам.пан.} = \left(\frac{T_{исп.пан.}}{365} \right) \cdot K_{пан.} \cdot H_a = \left(\frac{6}{365} \right) \cdot 5000000 \cdot \frac{1}{10} = 8000 \quad (41)$$

$$I_{ам.стол.} = \left(\frac{T_{исп.стол.}}{365} \right) \cdot K_{стол.} \cdot H_a = \left(\frac{6}{365} \right) \cdot 8000000 \cdot \frac{1}{10} = 12800 \quad (42)$$

$$I_{ам.ноут.} = \left(\frac{T_{исп.ноут.}}{365} \right) \cdot K_{ноут.} \cdot H_a = \left(\frac{80}{365} \right) \cdot 105000 \cdot \frac{1}{15} = 1260 \quad (43)$$

$$I_{ам.оборуд.} = 16000 + 8000 + 12800 + 1260 = 38060 \quad (44)$$

6.3.1 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

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

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} , \quad (45)$$

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

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

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

$$Z_{осн} = T_p \cdot Z_{дн} , \quad (46)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. ;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d} , \quad (47)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

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

В таблице 11 приведен баланс рабочего времени.

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней – выходные – праздничные	118	118
Потери рабочего времени – отпуск – невыходы по болезни	32	32
Действительный годовой фонд рабочего времени	215	215

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} * (1 + k_{пр} + k_d) * k_p, \quad (48)$$

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Z_{tc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15- 20 % от Z_{tc});

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата Z_{tc} находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_t и учитывается по единой для бюджетных организаций тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 18.

Таблица 12 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} , тыс. руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , тыс. руб.	$Z_{дн}$, тыс. руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, тыс. руб.	$Z_{доп}$, тыс. руб.
Руководитель	26,3	0,3	0,5	1,3	61,542	2,977	28	83,354	10,002
Студент	2,41	0,3	0,5	1,3	5,639	0,273	104	28,392	3,407
Итого $Z_{осн}$								111,724	13,409

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

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор (см. «Положение об оплате труда», приведенное на интернет-странице Планово-финансового отдела ТПУ).

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

3) иные выплаты; районный коэффициент.

6.3.2 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * З_{\text{осн}} \quad (49)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

6.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} * (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (50)$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 28%

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	$Z_{осн}$, тыс. руб.	$Z_{доп}$, тыс. руб.	$k_{внеб}$, %	$Z_{внеб}$, тыс. руб.
Руководитель	83,354	10,002	0,28	26,140
Студент	28,392	3,407	0,28	8,904
Итого $Z_{осн}$				35,044

6.4 Оценка целесообразности исследования

6.4.1 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:

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i * П_i \quad (51)$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака (таблица 14);

$П_i$ – количественная оценка i – го признака.

Таблица 14 – Весовые коэффициенты НТУ

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

Таблица 15– Шкала оценки новизны

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

Таблица 16 – 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 17 – 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:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i \quad (52)$$

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

$$\text{НТУ} = 0,7*9+0,6*6+0,5*4 = 11,4. \quad (53)$$

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

6.5 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 18–22.

Таблица 18 – 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 19 – 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 20 – 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 21 – 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 22 – 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.

6.5.1 Определение ресурсной эффективности

На данном этапе требуется определить показатели ресурсной эффективности данной разработки. В таблице 23 представлена сравнительная оценка характеристик трёх вариантов исполнения проекта. Первый вариант (текущий проект) это разработка математической модели формирования и обработки информации в методе дуальных энергий с учётом рациональной фильтрации рентгеновского излучения в программе Mathcad. Второй вариант (аналог 1) это разработка математической модели формирования и обработки информации в методе дуальных энергий с учётом рациональной фильтрации рентгеновского излучения в программе Mat lab. Третий вариант (аналог 2) представляет собой все вычисления вручную, используя программный пакет Microsoft для отображения модели.

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	3	1
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	3	1
3. Помехоустойчивость	0,1	5	1	1
4. Энергосбережение	0,1	3	2	4
5. Надёжность	0,15	5	2	2
6. Материалоёмкость	0,1	4	3	3
Итого:	1	27	14	12

Интегральный показатель ресурсоэффективности для текущего проекта:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 + 0,15 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 = 3,95$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности для аналога 1:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i = 0,25 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,1 \cdot 1 + 0,1 \cdot 2 + 0,15 \cdot 2 + 0,1 \cdot 3 = 2,1$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности для аналога 2:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i = 0,25 \cdot 1 + 0,15 \cdot 1 + 0,1 \cdot 1 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 2 + 0,1 \cdot 3 = 1,5$$

Основываясь на полученных результатах расчётов, можно сделать вывод, что наибольшей ресурсной эффективностью обладает текущий вариант проекта.

Заключение

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.

7 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.

7.1 Производственная безопасность

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

Общая система освещения. Освещение в помещениях регламентируется нормами в зависимости от характера зрительной работы, системы и вида освещения, фона, контраста объекта с фоном. Характеристика зрительной работы определяется наименьшим размером объекта различения. Основной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости. В расчётном задании должны быть решены вопросы выбора и расчета:

- системы освещения;
- источников света;
- светильников и их размещение;
- нормируемой освещённости;
- освещения методом светового потока.

Система освещения. Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего и комбинированного освещения. Для данного рабочего места рассчитывается общее равномерное освещение.

Источники света. Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания. Для общего освещения, применяются газоразрядные лампы, которые энергетически более экономичные и обладают большим сроком службы. Расчет произведен для люминесцентных ламп стандартной цветопередачи T8 G13, диаметром 26 мм фирмы Philips.

Светильники и их размещение. Светильник – прибор, перераспределяющий свет ламп внутри больших телесных углов и обеспечивающий угловую концентрацию светового потока. Светильник накладной WRS/S, крепящийся на поверхность потолка, под люминесцентную лампу 26 мм (T8 G13), мощностью 4x18 Вт. Параметры светильника: 610x625x80 мм.

Размещение светильников в помещении определяется следующими размерами:

- $H=3$ – высота помещения, м;
- $h_c=0,08$ – расстояние светильников от перекрытия, м;
- $h_n = H - h_c=2,92$ – высота светильника над полом, высота подвеса, м;
- $h_p=0,8$ – высота рабочей поверхности над полом, м;
- $h = h_n - h_p = 2,12$ – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью, м;
- L – расстояние между соседними светильниками или рядами;
- l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены.

Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены равно $L/3$.

Наилучшим вариантом равномерного размещения светильников являются шахматное размещение, расстояния между светильниками в ряду и между рядами светильников равны.

При равномерном размещении люминесцентных светильников, они располагаются обычно рядами – параллельно рядам оборудования. Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является

величина $\lambda = L/h$ – наивыгоднейшее расстояние между осветительными приборами, уменьшение которого удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. Эта величина зависит от кривой силы света светильника и для данного светильника $\lambda = 1,2 \dots 1,6$. Принимаем $\lambda = 1,3$.

Расстояние между светильниками L определяется как:

$$L = \lambda \cdot h = 1,3 \cdot 2,12 = 2,76 \text{ м.} \quad (53)$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены:

$$l = L / 3 = (\lambda \cdot h) / 3 = 0,92 \text{ м.} \quad (54)$$

Количество рядов светильников N и светильников в ряду M определим по формуле:

$$N = A / L = 5 / 2,76 = 1,81 \approx 2, \quad (55)$$

$$M = B / L = 10 / 2,76 = 3,62 \approx 4, \quad (56)$$

где A – ширина помещения;

B – длина помещения;

L – расстояние между светильниками.

Общее количество светильников:

$$n = N \cdot M = 2 \cdot 4 = 8. \quad (57)$$

Нормируемая освещённость. Выбор освещённости осуществляется в зависимости от:

- размера объёма различения (толщина линии, высота буквы);
- контраста объекта с фоном;
- характеристики фона.

В соответствии с требованиями по работе ПК, при работе с экраном в сочетании с работой над документами наиболее оптимальной для работы с экраном является освещённость 300 лк, при характеристике зрительных работ средней точности и разряде и подразряде зрительных работ IVб.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока,

учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_\beta \cdot z}{N \cdot n \cdot \eta} \cdot 100 = \frac{300 \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 8 \cdot 53} \cdot 100 = 1459 \text{ лм} \quad (58)$$

где E_n – нормируемая минимальная освещённость, лк;

S – площадь освещаемого помещения, м²;

K_β – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, наличие в атмосфере цеха дыма, пыли; для помещения с малым выделением пыли принимаем равным 1,5;

z – коэффициент неравномерности освещения, для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;

N – число ламп в светильнике, шт;

n – число светильников, шт;

η – коэффициент использования светового потока, %.

Коэффициент использования светового потока показывает долю светового потока ламп, которая попадает на рабочую поверхность. Зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h , коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_n .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{50}{2,12 \cdot (5 + 10)} = 1,57 \quad (59)$$

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно $\rho_c=50\%$ и потолка $\rho_n=70\%$. Значения коэффициента использования светового потока светильников с люминесцентными лампами примем равным 56 %.

Рассчитав световой поток Φ , зная тип лампы, выбираем ближайшую стандартную лампу – Philips TL-D 18W/54-765 мощностью 18 Вт. Характеристики ламп TL-D18W/54- 765 приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Характеристики ламп TL-D18W/54- 765

Мощность, Вт	Световой поток, лм	Цветовая температура, К	Цоколь	L, мм	D, мм	Производитель
18	1450	6500	G13	590	26	Philips

– электростатических полей.

Таблица 24 – 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.

7.2.2 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).

7.2.3 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.

7.2.4 Показатели микроклимата

Воздух рабочей зоны производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с СанПиНом 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений и приведены в таблице 25.

Таблица 25 – 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)

7.2.5 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.

7.2.6 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 26.

Таблица 26 – Допустимые значения эффективных доз для указанных категорий облучаемых лиц в хрусталике глаза, коже, кистях и стопах

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.

7.3 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.

7.4 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;

7.5 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.

7.6 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 негорюемых 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.

Также в помещении обязательно должен быть размещен план эвакуации при пожаре. (Рисунок 12)



Рисунок 12 – План эвакуации при пожаре и других Чс

7.7 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

7.7.1 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.

7.7.2 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.

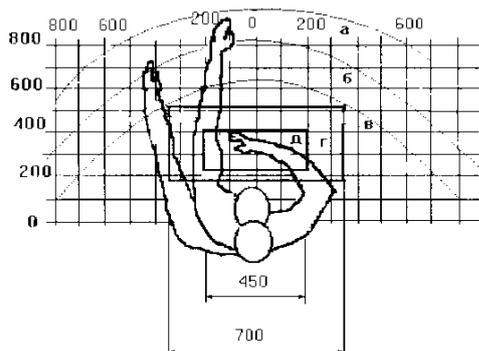


Рисунок 13 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

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.

7.8 Социальная защита пострадавших на производстве

Под социальной защитой работников в процессе труда понимается система экономических, социальных, правовых, организационных, медицинских и технических мер по защите работников от социальных и профессиональных рисков в процессе труда и в случае утраты трудоспособности на производстве, а также по обеспечению гарантированного обществом уровня и условий безопасности и гигиены труда, качества трудовой жизни на основе обеспечения законодательно установленных социальных гарантий жизнедеятельности человека.

7.8.1 Порядок возмещения вреда, причиненного жизни и здоровью граждан

Поскольку возмещение вреда, причиненного жизни или здоровью гражданина, производится в денежной форме, то важным является содержание статьи [61]:

1. При причинении гражданину увечья или ином повреждении его здоровья возмещению подлежит утраченный потерпевшим заработок (доход), который он имел либо определенно мог иметь, а также дополнительно понесенные расходы, вызванные повреждением здоровья, в том числе расходы на лечение, дополнительное питание, приобретение лекарств, протезирование, посторонний уход, санаторно-курортное лечение, приобретение специальных транспортных средств, подготовку к другой профессии, если установлено, что потерпевший нуждается в этих видах помощи и ухода и не имеет права на их бесплатное получение.

2. Объем и размер возмещения вреда, причитающегося потерпевшему в соответствии с настоящей статьей, могут быть увеличены законом.

7.8.2 Общие основания ответственности за причинение вреда

Статья [62] гласит:

1. Вред, причиненный личности или имуществу гражданина, а также вред, причиненный имуществу юридического лица, подлежит возмещению в полном объеме лицом, причинившим вред.

Законом обязанность возмещения вреда может быть возложена на лицо, не являющееся причинителем вреда.

Законом или договором может быть установлена обязанность причинителя вреда выплатить потерпевшим компенсацию сверх возмещения вреда.

2. Лицо, причинившее вред, освобождается от возмещения вреда, если докажет, что вред причинен не по его вине. Законом может быть предусмотрено возмещение вреда и при отсутствии вины причинителя вреда.

3. Вред, причиненный правомерными действиями, подлежит возмещению в случаях, предусмотренных законом.

7.8.3 Возмещение причиненного вреда

Основания и размер компенсации гражданину морального вреда определяются правилами. При этом компенсация морального вреда осуществляется независимо от подлежащего возмещению имущественного вреда.

Когда вред причинен жизни или здоровью гражданина источником повышенной опасности, компенсация морального вреда осуществляется независимо от вины причинителя вреда.

Статья [64] определяет:

1. Компенсация морального вреда осуществляется в денежной форме.

2. Размер компенсации морального вреда определяется судом в зависимости от характера причиненных потерпевшему физических и нравственных страданий, а также степени вины причинителя вреда в случаях, когда вина является основанием возмещения вреда. При определении размера компенсации вреда должны учитываться требования разумности и справедливости.

Характер физических и нравственных страданий оценивается судом с учетом фактических обстоятельств, при которых был причинен моральный вред, и индивидуальных особенностей потерпевшего.

Заключение

В работе проведён обзор литературы и постановка задач, касающихся выбора профилей выравнивающих фильтров в компьютерной томографии с режимом дуальных энергий, позволяющим осуществить одновременную оценку радиальных распределений плотности и эффективного атомного номера. Разработана математическая модель формирования итоговых проекций в системе компьютерной томографии с режимом дуальных энергий с учётом профилей предварительных фильтров рентгеновского (тормозного) излучения. Описана трансформация проекций в анализируемой реализации компьютерной томографии в проекции метода дуальных энергий. Предложен подход и адаптивный алгоритм выбора профилей предварительных (выравнивающих) фильтров применительно к анализируемой реализации компьютерной томографии, предназначенной для исследования структуры тел вращения. Подход базируется на выравнивании радиальных аналоговых сигналов. Методом численного эксперимента доказана эффективность применения выравнивающих фильтров в компьютерной томографии с режимом дуальных энергий. Усовершенствование систем компьютерной томографии введением выравнивающих фильтров с рационально выбранными профилями повышает точность оценок радиальных распределений плотности и эффективного атомного номера без потери производительности контроля.

Список публикаций

1. Кытманов Ю.А. и др. Метод дуальных энергий-две энергии-два параметра: оценка массовой толщины и эффективного атомного номера объекта контроля // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов VI Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 9-14 октября 2017 г., г. Томск.—Томск, 2017. – 2017. – С. 47.

2. Osipov S.P. , Chakhlov S.V. , Batranin A.V. , Osipov O.S. , Chin V., Kytmanov Y.A. Theoretical study of a simplified implementation model of a dual-energy technique for computed tomography // NDT and E International. - 2018 - Vol. 98. - p. 63-69

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Glasser O. WC Roentgen and the discovery of the Roentgen rays // *AJR. American journal of roentgenology*. – 1995. – V. 165. – No. 5. – p. 1033–1040.
2. Goodman P.C. The new light: discovery and introduction of the X-ray // *AJR. American journal of roentgenology*. – 1995. – V. 165. – No. 5. – p. 1041–1045.
3. Singh R. The Nobel laureate WC Roentgen and his X-rays // *Indian Journal of History of Science*. – 2016. – V. 51. – p. 521–530.
4. Carmignato S., Dewulf W., Leach R. (ed.). *Industrial X-ray computed tomography*. – Berlin : Springer International Publishing, 2018.
5. Gutiérrez Y., Ott D., Töpperwien M., Salditt T., Scherber C. X-ray computed tomography and its potential in ecological research: A review of studies and optimization of specimen preparation // *Ecology and evolution*. – 2018. – V. 8. – No. 15. – p. 7717–7732.
6. Boshoff W.P. A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials // *Construction and Building Materials*. – 2019. – V. 199. – p. 637–651.
7. Korner M., Weber C.H., Wirth S., Pfeifer K.J., Reiser M.F., Treitl M. *Advances in digital radiography: physical principles and system overview* // *Radiographics*. – 2007. – V. 27. – No. 3. – p. 675–686.
8. Seynaeve P.C., Broos J.I. The history of tomography // *Journal belge de radiologie*. – 1995. – V. 78. – No 5. – p. 284–288.
9. Bocage M. Procédé et dispositifs de radiographie sur plaque en mouvement // *Franz Patentschrift*. – 1922. – V. 536. – p. 464.
10. Friedland G.W., Thurber B.D. The birth of CT // *AJR. American journal of roentgenology*. – 1996. – V. 167. – No. 6. – p. 1365–1370.
11. Kalender W.A. *Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications*, 2nd edition. – Publicis Corporate Publishing, – 2005. – 304 pp.

12. Осипов С.П., Усачёв Е.Ю., Чахлов С.В., Щетинкин С.А., Манушкин А.А., Осипов О.С., Сергеева Н.А. Математическая модель цифровой линейной томографии // Дефектоскопия. – 2019. – №5. – С.54–64.
13. Hsieh, J. Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances. – Bellingham, WA: SPIE, 2003.
14. 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.
15. Glover, G.H., Pelc N.J. Nonlinear partial volume artifacts in x- ray computed tomography // Medical physics. – 1980. – Vol. – no. 3. – P. 238–248.
16. Hubbell J.H., Seltzer S.M. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z= 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. – National Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). Ionizing Radiation Div., 1995. – № PB-95-220539/XAB; NISTIR-5632.
17. Hubbell J.H. Review of photon interaction cross section data in the medical and biological context // Physics in Medicine & Biology. – 1999. – V. 44. – No. 1. – p. R1–R22.
18. Duerinckx A.J., Macovski A. Polychromatic streak artifacts in computed tomography images // Journal of Computer Assisted Tomography. – 1978. – V. 2. – No. 4. – p. 481–487.
19. Krumm M., Kasperl S., Franz M. Reducing non-linear artifacts of multi-material objects in industrial 3D computed tomography // NDT & E International. – 2008. – V. 41. – No. 4. – P. 242–251.
20. Duerinckx A.J., Macovski A. Nonlinear polychromatic and noise artifacts in x-ray computed tomography images // Journal of computer assisted tomography. – 1979. – V. 3. – No. 4. – P. 519–526.
21. URL: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

22. Alvarez R.E., Macovski A. Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography // *Physics in Medicine & Biology*. – 1976. – V. 21. – No. 5. – P. 733–744.
23. Brooks R.A. A quantitative theory of the Hounsfield unit and its application to dual energy scanning // *Journal of computer assisted tomography*. – 1977. – V. 1. – No. 4. – P. 487–493.
24. 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. – V. 13. – No. 3. – P. 334–339.
25. Rutt B., Henster A. Split-filter computed tomography: A simple technique for dual energy scanning // *J Comput Assist Tomogr*. – 1980. – V. 4. – No. 4. – P. 501–509.
26. Brooks R.A., Di Chiro G. Beam hardening in x-ray reconstructive tomography // *Physics in Medicine and Biology*. – 1976. – V. 21. – No. 3. – P. 390–398.
27. Alvarez R.E. Active energy selective image detector for dual-energy computed radiography // *Medical physics*. – 1996. – V. 23. – No. 10. – P. 1739–1748.
28. Осипов С.П., Удод В.А., Ван Я. Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов // *Дефектоскопия*. – 2017. – № 8. – С. 35–56.
29. Brooks R.A., Di Chiro G. Split-detector Computed Tomography: A Preliminary Report // *Radiology*. – 1978. – V. 126. – P. 255–257.
30. Osipov S., Chakhlov S., Batranin A., Osipov O., Kytmanov J. Theoretical study of a simplified implementation model of a dual-energy technique for computed tomography // *NDT & E International*. – 2018. – V. 98. – P. 63–69.
31. Schulze R., Heil U., Groß D., Bruellmann D.D., Dranischnikow E., Schwanecke U., Schoemer E. Artefacts in CBCT: a review // *Dentomaxillofacial Radiology*. – 2011. – V. 40. – No. 5. – P. 265–273.
32. Kataoka M.L., Hochman M.G., Rodriguez E.K., Lin P.J.P., Kubo S., Raptopoulos V.D. A review of factors that affect artifact from metallic hardware on

multi-row detector computed tomography // Current problems in diagnostic radiology. – 2010. – V. 39. – No. 4. – P. 125–136.

33. Guntoro P.I., Ghorbani Y., Koch P.H., Rosenkranz J. X-ray microcomputed tomography (μ CT) for mineral characterization: a review of data analysis methods // Minerals. – 2019. – V. 9. – N. 3. – P. 183.

34. Ahmed O.M.H., Song Y.A Review of common beam hardening correction methods for Industrial X-ray Computed Tomography // Sains Malaysiana. – 2018. – V. 47. – No. 8. – P. 1883–1890.

35. Nakano T., Nakashima Y. Analytical expressions for the reconstructed image of a homogeneous cylindrical sample exhibiting a beam hardening artifact in X-ray computed tomography // Journal of X-ray science and technology. – 2018. – V. 26. – No. 5. – P. 691–705.

36. Sarkar S., Wahi P., Munshi P. An empirical correction method for beam-hardening artifact in Computerized Tomography (CT) images //NDT & E International. – 2019. – V. 102. – P. 104–113.

37. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Li S., Sun X., Zheng J., Zhang G. Physical and technical restrictions of materials recognition by the dual high energy X-ray imaging // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – V. 12. – No. 23. – P. 13127–13136.

38. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: основы реконструктивной томографии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983.

39. Недавний О.И., Осипов С.П., Сидуленко О.А. Выбор профиля компенсирующего фильтра при восстановлении изображения объектов с кольцевыми структурами // Дефектоскопия. – 2002. – № 3. – С. 46–52.

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. Gholami M., Rashedi A., Lenoir N., Hautemayou D., Ovarlez G., Hormozi S. Time-resolved 2D concentration maps in flowing suspensions using X-ray // *Journal of Rheology*. – 2018. – V. 62. – No. 4. – P. 955–974.
43. Pandey S., Dixit S., Verma S. R. New stable numerical inversion of generalized Abel integral equation // *Logistics, Supply Chain and Financial Predictive Analytics*. – Springer, Singapore, 2019. – P. 111–123.
44. Antokhin I.I. An efficient and flexible Abel-inversion method for noisy data // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2016. – V. 463. – No. 2. – P. 2079–2084.
45. Zhang L., Schaeffer H. Stability and error estimates of BV solutions to the Abel inverse problem // *Inverse Problems*. – 2018. – V. 34. – No. 10. – No. article 105003.
46. Сторм, Э., Израэль, Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001–100 МэВ и элементов с 1 по 100): Справочник. – М: Атомиздат, 1973.
47. Kramers H. A. XCIII. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum // *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. – 1923. – V. 46. – No. 275. – P. 836–871.
48. Schiff L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // *Physical review*. – 1951. – V. 83. – P. 252–253.
49. Ali E.S.M., Rogers D.W.O. Functional forms for photon spectra of clinical linacs // *Physics in Medicine and Biology*. – 2011. – V. 57. – P. 31–50.
50. URL: http://www.azimp.ru/catalogue/Medipix_Timepix/
51. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. The mathematical model of image, generated by scanning digital radiography system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2017. – V. 168. – No. 1. – No. article 012042.

52. Osipov S., Libin E., Chakhlov S., Osipov O., Shtein A. Parameter identification method for dual-energy X-ray imaging // NDT & E International. – 2015. – V. 76. – P. 38–42.
53. Осипов С.П., Усачев Е.Ю., Чахлов С.В., Щетинкин С.А., Осипов О.С. Особенности распознавания материалов мультэнергетическим рентгеновским методом // Дефектоскопия. – 2019. – № 4. – С. 43–55.
54. СанПиН 2.2.4.548–96 – Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы
55. СНиП 23–05–95*, СП 52.13330.2011 – Естественное и искусственное освещение
56. НРБ–99/2009 – Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523–09 "Нормы радиационной безопасности
57. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
58. ГОСТ Р 22.0.01-94 Безопасность в ЧС. Основные положения.
59. ГОСТ Р 22.0.07-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.
60. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
61. Статья 1085 ГК РФ «Объем и характер возмещения вреда, причиненного повреждением здоровья»
62. Статья 1064 ГК РФ «Общие основания ответственности за причинение вреда»
63. Статья 151 ГК РФ «Обязательства вследствие причинения вреда»
64. Статья 1101 ГК РФ «Способ и размер компенсации морального вреда»

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Раздел

«Simplified Implementation of the Dual-Energy Method for Computed Tomography»

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ71	Кытманов Юрий Александрович		

Консультант школы отделения ИШНКБ, ОКД

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

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ШБИЦ, ОИЯ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Новикова В.С.			

Simplified Implementation of the Dual-Energy Method for Computed Tomography

Abstract. The article describes a simplified implementation of dual energy method (DEM) for computer tomography (CT). The implementation is based on the X-ray pre-filter. Two sets of projections, acquired for two maximal X-ray energies, are transformed to the projections of DEM parameters. The density and effective atomic number of the test object fragments are estimated after a separate recovery of the internal structure of the test object for each of the DEM parameters. The choice of pre-filter thickness is discussed. An example of the initial projections simulation and the estimation of the internal structure of cylindrical objects are shown.

Key words: X-ray radiation, dual energy method, computer tomography, preliminary X-ray filtering.

1. Introduction

The dual energy method was originally developed for the CT to compensate the X-ray beam hardening in case an attenuating object thickness increase. DEM is based on a representation of mass attenuation coefficient (MAC) by a sum of members consisted of two multiplicative components. First component depends on the energy only and has the same description for all attenuating materials. Second component is defined by the parameters of the test object (TO) and its material. The mentioned parameters are density and the effective atomic number. Representation of the MAC has defined the second direction of DEM application in digital radiography (DR) and computed tomography (CT). The integration of DR and DEM has led to the development of discrimination methods for materials and their separate fragments. With respect to CT DEM allows not only to reduce the beam hardening artifacts, but also to evaluate the distributions of the density and effective atomic number or DEM parameters for the volume of the test object. Note that the physical X-ray pre-filters are used to reduce the influence of the X-ray hardening and to reduce the range of the radiometric signal.

There are monochromatic DEM implementations [14-16], in which the information processing algorithms are simple and have a high speed. Work emphasized that the use of pre-filtering allows approximately associate the transformed X-rays with the

monochromatic gamma-ray source. This hardened X-ray beam is called pseudo-monochromatic. It is natural to assume that the choice of the pre-filter thickness essentially depends on the task. The scientific literature does not fully discuss the choice of the pre-filter thickness for the pseudo-monochromatic DEM implementation in CT. In particular, the criteria to select thickness are not formulated in a closed form.

2. Theoretical basis

To understand the theoretical basis of the pseudo-monochromatic DEM implementation we give a brief description of the monochromatic and classic DEM implementations and discuss the possible limits of these methods.

2.1. Monochromatic DEM implementation

We use one of the options to describe a dependence of measured radiometric signals from DEM parameters by expressions similar to. Let the test object with the mass thickness ρH and the effective atomic number Z is irradiated by gamma rays with energies E_1 and E_2 . The input of DEM algorithm has the digitized signals without object $I_d(E_1,0,Z)$, $I_d(E_2,0,Z)$ and with object $I_d(E_1,\rho H,Z)$, $I_d(E_2,\rho H,Z)$. The first stage of the algorithm estimates the TO thicknesses $Y(E_1,\rho H,Z)$, $Y(E_2,\rho H,Z)$. The corresponding expressions have form

$$\begin{aligned} Y(E_1,\rho H,Z) &= -\ln \frac{I_d(E_1,\rho H,Z)}{I_d(E_1,0,Z)} \\ Y(E_2,\rho H,Z) &= -\ln \frac{I_d(E_2,\rho H,Z)}{I_d(E_2,0,Z)} \end{aligned} \quad (1)$$

For the range of gamma radiation energies, not exceeding 1.022 MeV, the dependence of the radiation thicknesses $Y(E_1,\rho H,Z)$, $Y(E_2,\rho H,Z)$ from DEM parameters A and B is described by formulas

$$\begin{aligned} Y(E_1,\rho H,Z) &= m(E_1,Z)\rho H \approx Af_{photo}(E_1) + Bf_{Compt}(E_1) \\ Y(E_2,\rho H,Z) &= m(E_2,Z)\rho H \approx Af_{photo}(E_2) + Bf_{Compt}(E_2) \end{aligned} \quad (2)$$

where $m(E_1,Z)$, $m(E_2,Z)$ is MAC of gamma-radiation with energies E_1 and E_2 for the material with effective atomic number Z ; $f_{photo}(E)$, $f_{Compt}(E)$ is energy dependencies due to photoelectric and Compton effects.

The sign of approximate equality \approx is used in the formulas (2) intentionally. This sign reminds that the variants of interaction of gamma radiation with matter are not limited to the photoelectric and Compton effects. The effect of Rayleigh has a significant influence in the range of low-energy gamma radiation, as evidenced by data of the interaction of gamma radiation with matter given in the relevant databases.

For the analyzed range of gamma radiation the DEM parameters are associated with the TO characteristics by relations [16]

$$B = \rho H, \quad A = Z^\beta \rho H. \quad (3)$$

The theoretical value of the exponent β is 4, in practice, the value $\beta = 3.8$ is used more often. Basically, the β parameter value is determined by the range of the used energies and the range of effective atomic number.

For the approximation of energy dependence $f_{photo}(E)$ a power function with exponent α , $\alpha = 2.8$, $\alpha = 3$ etc. is used. Most likely, these discrepancies are related to the underestimation of the comment made above for the parameter β .

The dependence $f_{Compt}(E)$ is described by the expression, based on the classic Klein–Nishina formula. In some cases, this formula is not accurate due to the photon scattering by free electrons only.

In real conditions, the values of energies E_1 and E_2 are measured. The corresponding measured values of thicknesses Y_1 and Y_2 are related with parameters A and B a system of two linear equations of the form (2). The solution of this system has the form of two-dimensional linear regression without displacement

$$\begin{aligned} A &= Y_1 g_{22} + Y_2 g_{12} \\ B &= Y_1 g_{21} + Y_2 g_{11} \end{aligned} \quad (4)$$

The regression coefficients g_{ij} , $i=1..2$, $j=1..2$ have a strict physical interpretation, which follows from the expressions (2),

$$\begin{aligned} g_{11} &= -\frac{f_{photo}(E_1)}{r}, \quad g_{12} = -\frac{f_{Compt}(E_1)}{r}, \quad g_{21} = \frac{f_{photo}(E_2)}{r}, \quad g_{22} = \frac{f_{Compt}(E_2)}{r}. \quad (5) \\ r &= f_{photo}(E_1)f_{Compt}(E_2) - f_{photo}(E_2)f_{Compt}(E_1) \end{aligned}$$

In practice, the theoretical expressions are meaningful only for preliminary estimation of the choice correctness for energies E_1 and E_2 . The value of the auxiliary parameter r must be significantly different from zero.

In experimental applications the two-dimensional linear regression coefficients g_{ij} , $i=1..2, j=1..2$ are on the calibration stage. The fragments of the relevant test object should cover the entire area of consumer interest for the ranges of mass thickness ρH and effective atomic number Z .

2.2. Classic DEM implementation

In the classic DEM implementation the primary information processing is the same as for monochromatic one, and it is reduced to the calculation of the radiation thicknesses $Y(E_1, \rho H, Z)$, $Y(E_2, \rho H, Z)$. The difference is the usage of X-ray sources with maximum energies E_1 and E_2 . In this case, the system of connection DEM parameters A and B has form [1, 16] which is more complicated than system (4),

$$Y(E_1, \rho H, Z) = -\ln \frac{\int_0^{E_1} F(E, E_1) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-Af_{photo}(E) - Bf_{Compt}(E)} dE}{\int_0^{E_1} F(E, E_1) E_{ab}(E) \varepsilon(E) dE}, \quad (5)$$

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

where $F(E, E_i)$, $i=1,2$ are the digital energy spectra of X-ray with maximum energies E_i ; $E_{ab}(E)$ is a mean value of the absorbed energy of registered photon with energy E ; $\varepsilon(E)$ is an energy distribution of the detector registration efficiency.

In work the main approaches to solving a system of non-linear parametric equations (5) were analyzed. The classical solution of the system requires an analytical description of all necessary functions. Above it mentioned that there are some problems in the description of energy dependencies $f_{photo}(E)$, $f_{Compt}(E)$. Known approaches to evaluate the $E_{ab}(E)$ dependencies in view of leakage secondary photons and electrons are in need of updating. Above all, this is due to the miniaturization of

sensitive volumes of radiometric detectors. The existing approximation of the X-ray energy spectra, for example, do not have the accuracy levels required for the analyzed problem. It should also be noted that the DEM models described by systems (2) and (5) can be sufficiently far from reality. The influence of different physical and technical factors, leading to the displacement of the DEM parameter estimates, is discussed in.

The high-performance and high-efficiency methods to evaluate DEM parameters A and B proposed in required the use of special complex test objects.

The use of pre-filter allows us to consider the transformable X-rays radiation as pseudo-monochromatic one. The following briefly outlines the method basics.

2.3. Pseudo-monochromatic DEM implementation

The X-ray pre-filter leads to the transformation of the original power spectrum. When the acquisition of initial digital radiographs is spaced in time, it is advisable to use filters with different thickness h_1 and h_2 . If the time separation cannot be implemented, then $h_1=h_2$. Taking into account the filter, system (5) takes the form

$$Y(E_1, \rho H, Z) = -\ln \frac{\int_0^{E_1} F(E, E_1) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m_f(E) \rho_f h_1} e^{-Af_{photo}(E) - Bf_{Compt}(E)} dE}{\int_0^{E_1} F(E, E_1) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m_f(E) \rho_f h_1} dE}, \quad (6)$$

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

where $m_f(E)$ is the energy dependence of MAC for the filter material; ρ_f , h_f are the density of filter material and its thickness.

The system (6) is the starting point for the development of the mass thickness pre-filters h_1 and h_2 selection. To do this, you must define the criterion to select the filter thickness.

2.4. The criterion to select the filter thickness

The mass thickness of pre-filter $\rho_f h_f$ is selected by the simplification of the DEM implementation. The simplification is reduced to a hypothetical replacement of X-ray source with a continuous spectrum by a source of pseudo-monochromatic photon radiation. As a result of such replacement the DEM parameter estimation algorithm is based on the system (4). The main question is a selection of the transformed X-ray energy spectrum close to a spectrum of certain mono-energetic gamma-ray source.

When comparing the different DEM implementations there are two basic approaches – by the degree of closeness of initial and final informative parameters. It should be noted that the DEM parameters for the analyzed problem are intermediate. The final parameters of CT, supplemented by DEM are the density distribution ρ , and the effective atomic number Z , or a function of Z . It is evident that at the stage of preliminary calculations of pre-filter thicknesses the most easily implemented approach is based on the estimation accuracy of DEM parameters A and B . To study the transformation of the displacement parameters A and B into the displacement of distributions of the density ρ and the effective atomic number Z it is convenient to use an axisymmetric test object, for example, and apply the Abel inversion of the initial projections.

We give appropriate expressions to illustrate how use the Abel inversion. Let the test object is a cylinder with radius R , see. Fig. 1. Suppose we have a radial distribution of a parameter q . This parameter may be a MAC (for mono-energetic radiation source) or the DEM parameters a and b .

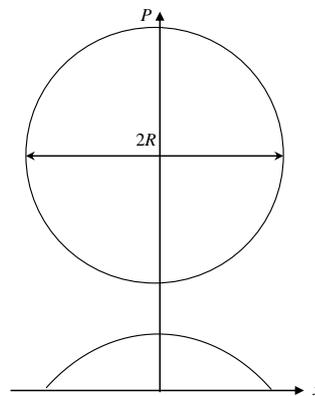


Fig 1. Test object and the unit radiographic projection

Let $P(x)$ is a distribution of the parameter q integrated along a ray (projection). Then the relationship of the radial distribution $q(r)$ and the projection $P(x)$ is described by an expression (Abel inversion)

$$q(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{P'(x)}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx. \quad (7)$$

The projection $A(x)$ and $B(x)$ go to the input of the reconstruction algorithm, and the distributions $a(r)$ and $b(r)$ are formed at the output. The estimates of the radial distributions of density and effective atomic number are derived from these distributions in accordance with the expressions (3)

$$\rho(r) = b(r), \quad Z(r) = \beta \sqrt{\frac{a(r)}{b(r)}}. \quad (8)$$

Expressions (7), (8) are derived for small size of the detector's aperture. In practice, to estimate the radial density distribution the distribution $b(r)$ is multiplied by a desired factor.

The expressions (1) - (8) are sufficient to investigate the influence of the pre-filter thickness on the evaluations of distributions of the density and the effective atomic number for the pseudo-monochromatic DEM implementation.

An approach based on the given maximum deviations of the final parameters can be a main criterion to select the pre-filters thicknesses. Let $\Delta\rho$ and ΔZ are the user defined maximal values of the systematic error estimation of the distributions of density and effective atomic number. Then the generalized criterion to select the pre-filter thickness $h_1=1$ and h_2 is described by the system of inequalities

$$|\rho(r, h_1, h_2) - \rho_t(r)| \leq \Delta\rho; \quad |Z(r, h_1, h_2) - Z_t(r)| \leq \Delta Z; \quad (\rho_t, H, Z_t) \in V, \quad (9)$$

there $\rho_t(r)$ and $Z_t(r)$ are real distributions of the density and the effective atomic number; V is a discrete or continuous set, defined by the ranges of the test object mass thickness and effective atomic numbers.

The X-ray pre-filter decrease the examination performance, so an additional restriction of the criterion (9) is the permissible increase of measurement time in the specified number of times k_{lim} . Since the object examination performance is determined by its maximum radiation thickness $\rho_t H_{max}$, it is logical to calculate the

magnification of examination time k_g , caused by the pre-filtering of radiation, by the expression

$$k_g \approx \frac{1}{t_1 + t_2} \sum_{i=1}^2 \frac{t_i \int_0^{E_i} F(E, E_i) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m(E, Z) \rho_i H_{\max}} dE}{\int_0^{E_i} F(E, E_i) E_{ab}(E) \varepsilon(E) e^{-m(E, Z) \rho_i H_{\max}} e^{-m_f(E) \rho_f h_2} dE}, \quad (10)$$

here t_i is a measurement time for the X-ray radiation with the maximal energy E_i .

A further limitation to the system of inequalities (9) is as follows

$$k_g(h_1, h_2) < k_{lim}. \quad (11)$$

Note that the set of inequalities (9) and (11) may not have a solution. In this case, the user of the developed method should decide with his preferences. The user should choose what he can sacrifice – the density estimation precision, and (or) the effective atomic number estimation precision, and (or) examination performance.

An additional criterion is the workability, for example, the formation of pre-filters from the plates of the same thickness.

The foregoing is a generalized criterion to select the thicknesses of X-ray pre-filter for the CT method, complemented by pseudo-monochromatic DEM implementation.

3. The influence of the pre-filter thickness on the accuracies of density and effective atomic number

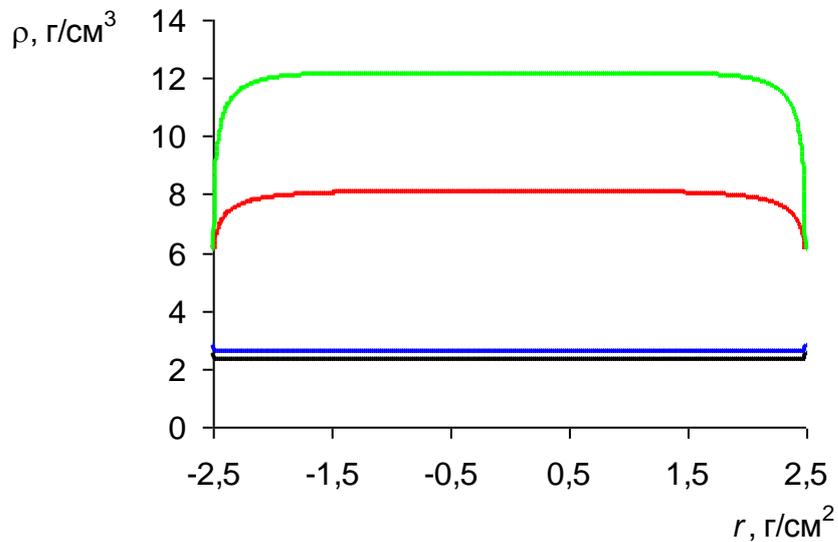
We investigate the influence of pre-filtering on the accuracies of density and effective atomic number for two classes of axisymmetric objects. The first class includes homogeneous objects, and the second - non-uniform.

3.1. Homogeneous cylindrical objects

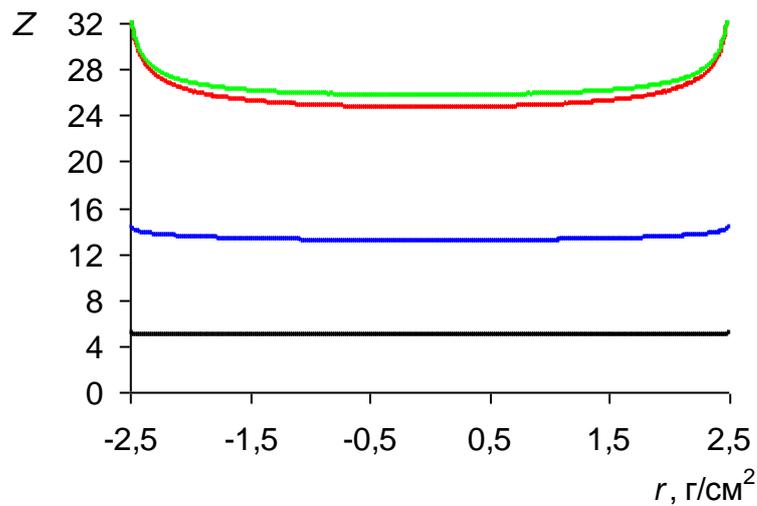
We select to study the uniform cylindrical objects from carbon with density 2.26 g/sm³, from aluminum with density 2.7 g/sm³ and from steel with density 7.86 g/sm³. The diameter of cylinders is 5 g/sm² in mass thickness units. The maximal energies of X-ray radiation are $E_1=100$ keV, $E_2=225$ keV.

Figure 2 shows the radial dependence $\rho(r)$ and $Z(r)$ for cylinders made of carbon, aluminum, steel, copper and with the copper pre-filters thicknesses $h_1=1$ mm and $h_2=5$ mm. For these filter thicknesses the linear regression coefficients (4) and the

values of approximating parameter β were obtained by least squares method for the DEM parameter Z dependence on $g_{11}=9.3455$; $g_{12}=-15719$; $g_{21}=-1.7088$; $g_{22}=13359$; $\beta=2.705$.



a



b

Fig. 2. Radial dependences *a* – $\rho(r)$ and *b* – $Z(r)$ for the copper pre-filter thicknesses

$h_1=1$ mm and $h_2=5$ mm: — carbon; — aluminum; — steel; — copper

The use of pre-filters for this calculation will reduce the examination performance approximately in 2.8 times. This significantly reduces the influence of X-ray beam hardening, and it is possible to estimate the radial distributions of density and effective atomic numbers with sufficient accuracy. The effect, observed on the cylinder boundary, essentially depends on the effective atomic number of the test

object material. For aluminum and carbon, the offsets of estimations of density and effective atomic number are insignificant for the thicknesses of selected filters.

As the parameters that characterize the effectiveness of the pre-filtering in DEM we can use: the ranges of density changes (ρ_{min}, ρ_{max}) and effective atomic numbers (Z_{min}, Z_{max}); and reduction factor of productivity k_g . Table 1 shows these effectiveness parameters of the copper pre-filters usage in the pseudo-monochromatic DEM implementation in conjunction with CT.

From the analysis in Table 1, several conclusions can be considered for the selected maximum X-ray energies. Increasing the pre-filter thickness over 3 mm is inappropriate for less energy and for higher energy - over 10 mm. The inexpediency caused a significant decrease in examination performance. There are significant systematic errors for estimates of density and effective atomic number for the outer regions of the test object and less significant - for the inner regions. The levels of systematic errors can be significantly reduced with the help of calibration tests of the special test objects. However, the determination of the reasons of these offsets is necessary for a correct usage of the method to select the pre-filter thickness for the specific test objects.

Hypothesis. The most likely reason of the offsets of estimates of the density and the effective atomic number is a non-adequate description of the energy dependence of MAC by formulas (3) and (4).

Table 1. The effectiveness of the copper pre-filters in CT with DEM usage

$h_1, \text{ mm}$	$h_2, \text{ mm}$	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

It is noted above that expression (4) does not take into account the effect of coherent scattering, which is significant for the considered materials and the energy of gamma rays less than 150 keV.

To confirm or refute the hypothesis, we made some calculations to estimate the distributions of density and effective atomic number for mono-energetic DEM implementation with the energies of gamma-ray $E_1=9.5$ keV, $E_2=142$ keV. The selected energies correspond approximately to the effective X-ray energies for the calculation example. Above it was shown that the most significant offset of the unknown estimations is observed at the boundary of steel objects, so Figure 3 shows the radial dependences of errors $\delta\rho(r)$ and $b - \delta Z(r)$ for mono-energetic gamma rays and pseudo-monochromatic X-ray radiation, formed by the copper filters with thicknesses $h_1=4$ mm and $h_2=10$ mm.

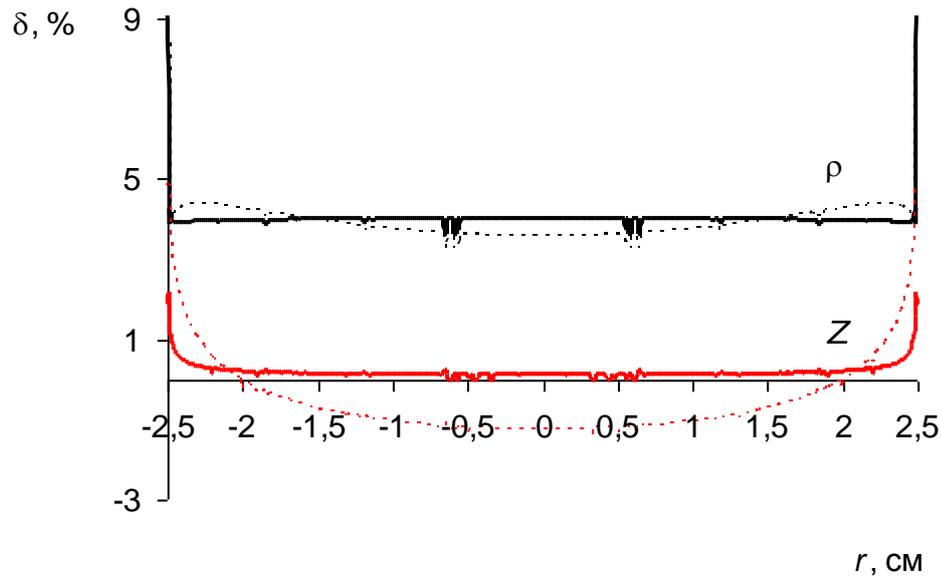


Fig. 3. Errors $\delta\rho(r)$ and $\delta Z(r)$ for steel cylinder:
 —, — — mono-energetic gamma rays;
 - - -, - - - - pseudo-monochromatic X-ray radiation

Analysis of the data from Figure 3 allows to confirm the hypothesis formulated above. The systematic errors of density estimates for a mono-energetic gamma rays and pseudo-monochromatic X-ray radiation do not differ by more than 0.6% for the points of the inner portion of the object. The specified accuracy is sufficient for the main practical applications of CT in conjunction with DEM. For the systematic errors of the radial distributions of the effective atomic number the differences are more significant but do not exceed 1.2% for the central region of the cylinder. Underestimation of the effective atomic number is not more than 0.32 units, which also can be considered as a quite satisfactory result. It should be noted that it is stronger overvaluation of the effective atomic number compare to the density on the boundary.

The pre-filter thicknesses are chosen taking into account the changes in the TO mass thicknesses and effective atomic numbers of materials based on the specified errors of density and effective atomic number.

Note that if the level of errors ρ and Z does not satisfy the user, then a possible solution is the use of triple-energy [30]. In this method TO is scanned by X-rays with

a three specially selected maximal energies. A stage of pretreatment of initial projections is reduced to selection of the method parameters. For coherent scattering in addition to the above mentioned parameters A and B we calculate the C parameter, which is associated with the parameters of the object ρH and Z by a simple relation

$$C = Z\rho H . \quad (12)$$

It is natural to expect that the MAC of gamma radiation in the form of a sum corresponding coefficients for the photoelectric effect, incoherent and coherent scattering will be significantly more accurate than the expression (2). The same may be said about the pseudo-monochromatic implementation of the triple-energy method on the base of pre-filtration.

3.2 Multilayer cylindrical objects

A hypothetical four-layer cylindrical object was selected to confirm the applicability of the analyzed method to more complex test objects. The cylinder radius is $R_0=15$ mm. The cylinder consists of the following layers: first layer with thickness $0.2R_0$ of carbon with density 2.26 g/sm^3 ; second layer with thickness $0.2R_0$ of aluminum with density 2.7 g/sm^3 ; third layer with thickness $0.3R_0$ of copper with density 8.92 g/sm^3 ; internal rod with radius $0.3R_0$ of steel with density 7.86 g/sm^3 . The maximal X-ray energies are $E_1=100 \text{ keV}$, $E_2=225 \text{ keV}$, the corresponding copper filter thicknesses are $h_1=4 \text{ mm}$ and $h_2=10 \text{ mm}$.

Figure 4 shows the evaluation results of radial distributions $\rho(r)$ and $Z(r)$ for the test object.

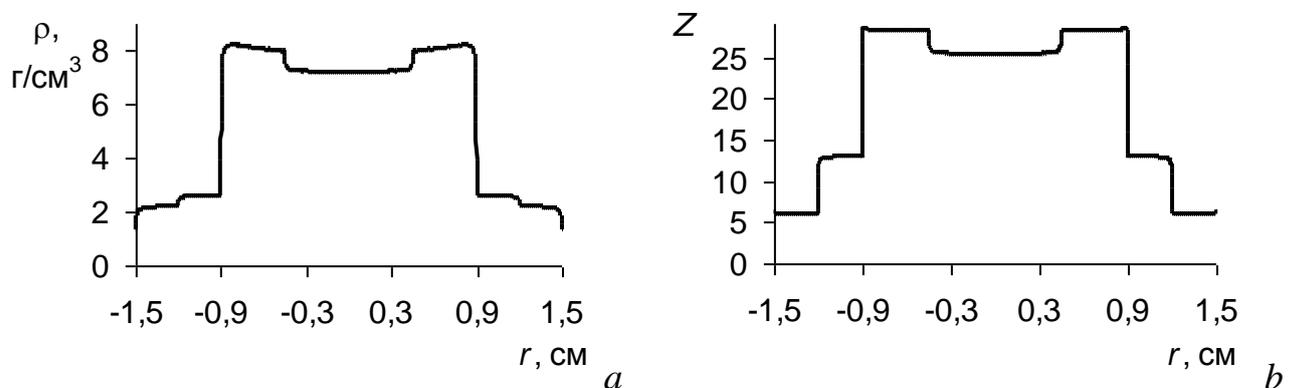


Fig. 4. Multilayer cylindrical object. The radial dependences $a - \rho(r)$, $b - Z(r)$ for the copper pre-filter thicknesses $h_1=4 \text{ mm}$ and $h_2=10 \text{ mm}$

Considering Figure 4 one can make a conclusion about the satisfactory discrimination of the materials fragments by density and about the good discrimination by the effective atomic number.

Figure 5 shows the quality of materials discrimination by the effective atomic number. The maximum offset of Z estimations does not exceed the absolute value of 0.8 units of effective atomic number. More significant deviations occur at the material boundaries.

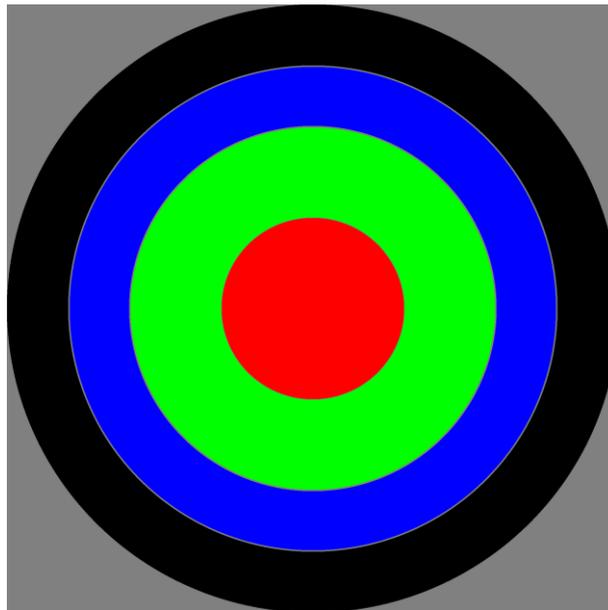


Fig. 5. Material discrimination for multilayer cylindrical object by CT with the monochromatic DEM:

■ – carbon; ■ – aluminum; ■ – steel; ■ – copper

4 Conclusion

Analysis of the theoretical research results and calculations prove a possibility of accurate estimation of the spatial distribution of the effective atomic number by CT method in combination with a pseudo-monochromatic DEM. The selection of pre-filter thickness is based on a compromise between an increase of accuracy of spatial distributions of density and effective atomic number and a decrease of the examination performance compared to the classical DEM implementation of CT.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Алгоритм и программа в системе Mathcad для его реализации для численного моделирования оценки распределений плотности и эффективного атомного номера методом компьютерной томографии в режиме дуальных энергий применительно к неоднородным объектам с осевой симметрией с учётом профиля предварительного фильтра.

ORIGIN := 1 Счётчик элементов от 1 (единицы)

Блок исходных данных по ослаблению гамма-излучения

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

Эффективные атомные номера и молярные массы в файле ZM.txt, находящемся в директории программы

Первый столбец – эффективные атомные номера Z_e

Второй столбец – молярные массы M_z

$MZ := \text{READPRN}("ZM.txt")$

Ввод данных по материалам: файл 82.txt находится в директории программы

$C := \text{READPRN}("82.txt")$ Количество химических элементов в таблице $i0 := \text{cols}(C) - 1 = 80$

Количество групп энергий $j0 := \text{rows}(C) = 127$

Счётчик строк Счётчик столбцов

$j := 1..j0$ $i := 1..i0$ $Z_e := MZ^{(1)}$ $M_z := MZ^{(2)}$

Энергии переводятся в кэВ, сечения и энергия зарегистрированного фотона ранжируются по возрастанию энергии, сечения пересчитываются в МКО

В базах данных энергии от максимума к минимуму, сделает перестановку от минимума до максимума

$E := \text{reverse}(C^{(1)}) \cdot 0.001$ $mm^{(i)} := \text{reverse}(C^{(i+1)}) \cdot \frac{NA \cdot 10^{-24}}{Mz_i}$

Блок аппроксимации массовых коэффициентов ослабления

Вычисление коэффициентов сплайнов для МКО $vcc^{(i)} := \text{cspline}(E, mm^{(i)})$

Задание функций-сплайнов для МКО

$$\text{mas}(x, i) := \text{interp}(\text{vcc}^{(i)}, E, \text{mm}^{(i)}, x)$$

Сцинтиллятор CdWO_4 плотность $\rho_{\text{sc}} := 7.9$

$$\text{МКО сцинтиллятора} \quad \text{msc}(x) := \frac{\text{mas}(x, 74) \cdot \text{Mz}_{74} + \text{mas}(x, 48) \cdot \text{Mz}_{48} + 4 \cdot \text{mas}(x, 8) \cdot \text{Mz}_8}{\text{Mz}_{74} + \text{Mz}_{48} + 4 \cdot \text{Mz}_8}$$

Эффективность регистрации $\varepsilon(x, \text{hsc}) := 1 - e^{-\text{msc}(x) \cdot \rho_{\text{sc}} \cdot \text{hsc}}$

Данные для расчётов Энергетический спектр (формула Шиффа) $f(\text{emax}, x) := \frac{\text{emax} - x}{x}$

$$Y(\text{emax}, \text{hsc}, \rho\text{H}, Z, \text{hf}) := -\ln \left(\frac{\int_5^{\text{emax}} f(\text{emax}, x) \cdot x \cdot e^{-\text{mas}(x, Z) \cdot \rho\text{H}} \cdot \varepsilon(x, \text{hsc}) \cdot e^{-\text{hf} \cdot \text{mas}(x, 29)} dx}{\int_5^{\text{emax}} f(\text{emax}, x) \cdot x \cdot e^{-\text{hf} \cdot \text{mas}(x, 29)} dx} \right)$$

$N := 300$ $\text{rsc} := 1$ $\text{hsc} := 1$ $\rho_{\text{fe}} := 7.86$ $\rho_{\text{c}} := 2$ $\rho_{\text{al}} := 2.7$ $\rho_{\text{cu}} := 8.93$

$e_2 := 225$ $e_1 := 100$ $R_0 := 1.5$ $R_1 := 0.8 \cdot R_0$ $R_2 := 0.6 \cdot R_0$ $R_3 := 0.3 \cdot R_0$

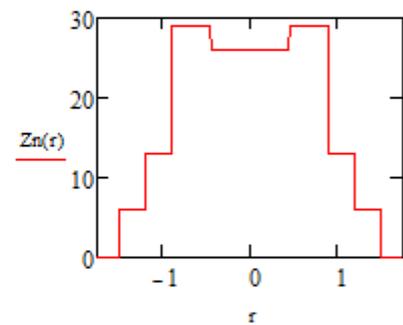
$N := 512$ $i := 1..N + 1$ $L := R_0 + 0.25$ $i := 1..N + 1$

$$\rho := \begin{pmatrix} \rho_{\text{c}} \\ \rho_{\text{al}} \\ \rho_{\text{cu}} \\ \rho_{\text{fe}} \end{pmatrix} \quad Z := \begin{pmatrix} 6 \\ 13 \\ 29 \\ 26 \end{pmatrix}$$

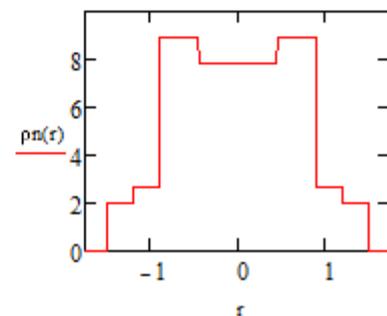
$$\Delta := \frac{2 \cdot L}{N} \quad YY_i := -L + (i - 1) \cdot \Delta \quad YY_1 := -L + 0.00001 \quad YY_{N+1} := L - 0.00001$$

$$X_i := \begin{cases} 0.00001 & \text{if } 2 \cdot \sqrt{R0^2 - (YY_i)^2} \leq 0. \\ 2 \cdot \sqrt{R0^2 - (YY_i)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Zn(r) := \begin{cases} \text{res} \leftarrow 0 & \text{if } |r| > R0 \\ \text{res} \leftarrow Z_1 & \text{if } R1 < |r| \leq R0 \\ \text{res} \leftarrow Z_2 & \text{if } R2 < |r| \leq R1 \\ \text{res} \leftarrow Z_3 & \text{if } R3 < |r| \leq R2 \\ \text{res} \leftarrow Z_4 & \text{if } 0 \leq |r| \leq R3 \\ \text{res} \end{cases}$$



$$\rho n(r) := \begin{cases} \text{res} \leftarrow 0 & \text{if } |r| > R0 \\ \text{res} \leftarrow \rho_1 & \text{if } R1 < |r| \leq R0 \\ \text{res} \leftarrow \rho_2 & \text{if } R2 < |r| \leq R1 \\ \text{res} \leftarrow \rho_3 & \text{if } R3 < |r| \leq R2 \\ \text{res} \leftarrow \rho_4 & \text{if } 0 \leq |r| \leq R3 \\ \text{res} \end{cases}$$

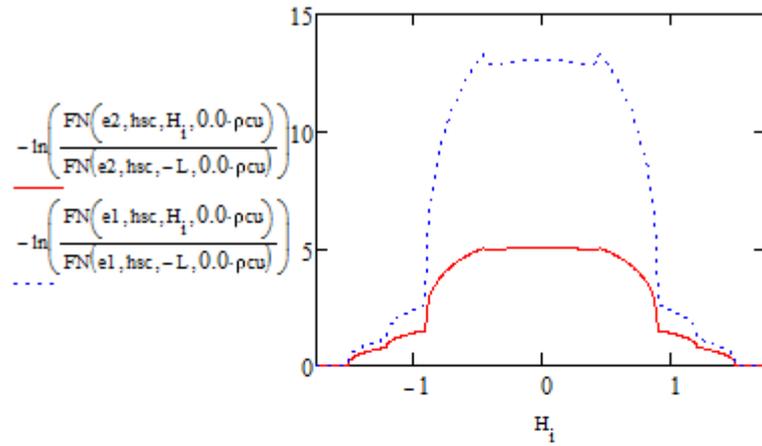


$$\begin{aligned}
\text{FN}(\text{em}, \text{hs}, \text{H}, \text{hf}) := & \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
& h_1 \leftarrow \sqrt{R_0^2 - H^2} \text{ if } R_1 \leq |H| < R_0 \\
& \text{if } R_2 \leq |H| < R_1 \\
& \quad \left| \begin{aligned} h_1 &\leftarrow \sqrt{R_0^2 - H^2} - \sqrt{R_1^2 - H^2} \\ h_2 &\leftarrow \sqrt{R_1^2 - H^2} \end{aligned} \right. \\
& \text{if } R_3 \leq |H| < R_2 \\
& \quad \left| \begin{aligned} h_1 &\leftarrow \sqrt{R_0^2 - H^2} - \sqrt{R_1^2 - H^2} \\ h_2 &\leftarrow \sqrt{R_1^2 - H^2} - \sqrt{R_2^2 - H^2} \\ h_3 &\leftarrow \sqrt{R_2^2 - H^2} \end{aligned} \right. \\
& \text{if } 0 \leq |H| < R_3 \\
& \quad \left| \begin{aligned} h_1 &\leftarrow \sqrt{R_0^2 - H^2} - \sqrt{R_1^2 - H^2} \\ h_2 &\leftarrow \sqrt{R_1^2 - H^2} - \sqrt{R_2^2 - H^2} \\ h_3 &\leftarrow \sqrt{R_2^2 - H^2} - \sqrt{R_3^2 - H^2} \\ h_4 &\leftarrow \sqrt{R_3^2 - H^2} \end{aligned} \right. \\
\text{res} \leftarrow & \int_5^{\text{em}} f(\text{em}, x) \cdot x \cdot \varepsilon(x, \text{hs}) \cdot e^{-\text{mas}(x, 29) \cdot \text{hf}} \cdot e^{-2 \cdot \sum_{ii=1}^4 (\text{mas}(x, Z_{ii}) \cdot \rho_{ii} \cdot h_{ii})} \cdot dx \\
& \text{res}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{YA}(\text{em}, \text{hs}, \text{H}) := & \left(\begin{array}{c} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{array} \right) \leftarrow \left(\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right) \\
& h_1 \leftarrow \sqrt{R0^2 - H^2} \text{ if } R1 \leq |H| < R0 \\
& \text{if } R2 \leq |H| < R1 \\
& \quad \left| \begin{array}{l} h_1 \leftarrow \sqrt{R0^2 - H^2} - \sqrt{R1^2 - H^2} \\ h_2 \leftarrow \sqrt{R1^2 - H^2} \end{array} \right. \\
& \text{if } R3 \leq |H| < R2 \\
& \quad \left| \begin{array}{l} h_1 \leftarrow \sqrt{R0^2 - H^2} - \sqrt{R1^2 - H^2} \\ h_2 \leftarrow \sqrt{R1^2 - H^2} - \sqrt{R2^2 - H^2} \\ h_3 \leftarrow \sqrt{R2^2 - H^2} \end{array} \right. \\
& \text{if } 0 \leq |H| < R3 \\
& \quad \left| \begin{array}{l} h_1 \leftarrow \sqrt{R0^2 - H^2} - \sqrt{R1^2 - H^2} \\ h_2 \leftarrow \sqrt{R1^2 - H^2} - \sqrt{R2^2 - H^2} \\ h_3 \leftarrow \sqrt{R2^2 - H^2} - \sqrt{R3^2 - H^2} \\ h_4 \leftarrow \sqrt{R3^2 - H^2} \end{array} \right. \\
& \text{res} \leftarrow 2 \cdot \sum_{ii=1}^4 (\text{mas}(\text{em}, Z_{ii}) \rho_{ii} \cdot h_{ii}) \\
& \text{res}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Yf(em, hs, H, hf) := & \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
& h_1 \leftarrow \sqrt{R0^2 - H^2} \text{ if } R1 \leq |H| < R0 \\
& \text{if } R2 \leq |H| < R1 \\
& \quad \begin{cases} h_1 \leftarrow \sqrt{R0^2 - H^2} - \sqrt{R1^2 - H^2} \\ h_2 \leftarrow \sqrt{R1^2 - H^2} \end{cases} \\
& \text{if } R3 \leq |H| < R2 \\
& \quad \begin{cases} h_1 \leftarrow \sqrt{R0^2 - H^2} - \sqrt{R1^2 - H^2} \\ h_2 \leftarrow \sqrt{R1^2 - H^2} - \sqrt{R2^2 - H^2} \\ h_3 \leftarrow \sqrt{R2^2 - H^2} \end{cases} \\
& \text{if } 0 \leq |H| < R3 \\
& \quad \begin{cases} h_1 \leftarrow \sqrt{R0^2 - H^2} - \sqrt{R1^2 - H^2} \\ h_2 \leftarrow \sqrt{R1^2 - H^2} - \sqrt{R2^2 - H^2} \\ h_3 \leftarrow \sqrt{R2^2 - H^2} - \sqrt{R3^2 - H^2} \\ h_4 \leftarrow \sqrt{R3^2 - H^2} \end{cases} \\
& ff(x) \leftarrow -2 \cdot \sum_{ii=1}^4 (\text{mas}(x, Z_{ii}) \rho_{ii} \cdot h_{ii}) \\
& g(x) \leftarrow f(em, x) \cdot x \cdot \varepsilon(x, hs) \cdot e^{-\text{mas}(x, 29) \cdot hf} \\
& \text{res} \leftarrow -\ln \left(\frac{\int_5^{em} g(x) \cdot e^{ff(x)} dx}{\int_5^{em} f(em, x) \cdot x \cdot \varepsilon(x, hs) dx} \right) \\
& \text{res}
\end{aligned}$$

$$i := 1..N+1 \quad H_i := -L + 2 \cdot \frac{L \cdot (i-1)}{N}$$



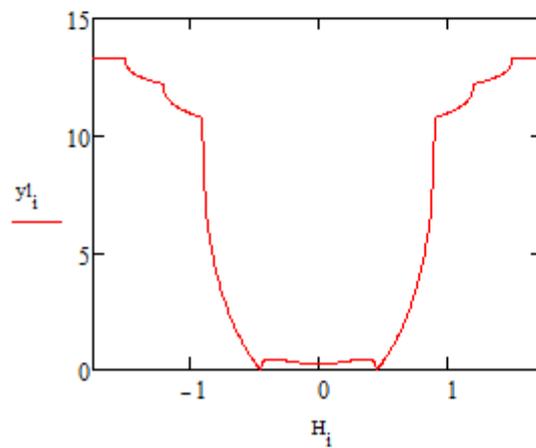
$$hig0_i := -\ln\left(\frac{FN(e2, hsc, H_i, 0.0, \rho_{cu})}{FN(e2, hsc, -L, 0.0, \rho_{cu})}\right) \quad lo0_i := -\ln\left(\frac{FN(e1, hsc, H_i, 0.0, \rho_{cu})}{FN(e1, hsc, -L, 0.0, \rho_{cu})}\right)$$

$$hma := \max(hig0) = 5.06114$$

$$lma := \max(lo0) = 13.32928$$

$$yh_i := hma - hig0_i$$

$$yl_i := lma - lo0_i$$

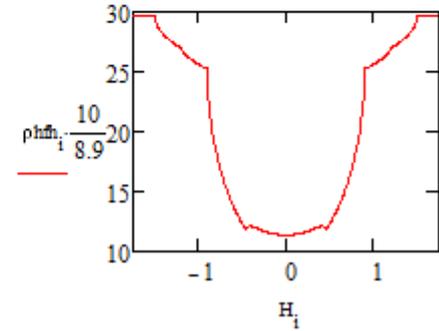
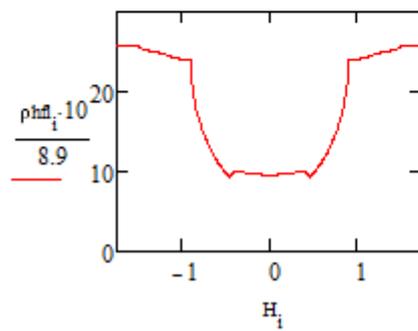


rh := 0.2 qq := 0.4 · ρcu

$$\rho_{fh_i} := \max\left(0, \text{root}\left(-\ln\left(\frac{\text{FN}(e1, \text{hsc}, H_i, \text{rh})}{\text{FN}(e1, \text{hsc}, -L, \text{qq})}\right) - \text{lma}, \text{rh}\right)\right)$$

rh := 0.1 Y(emax, hsc, ρH, Z, hf)

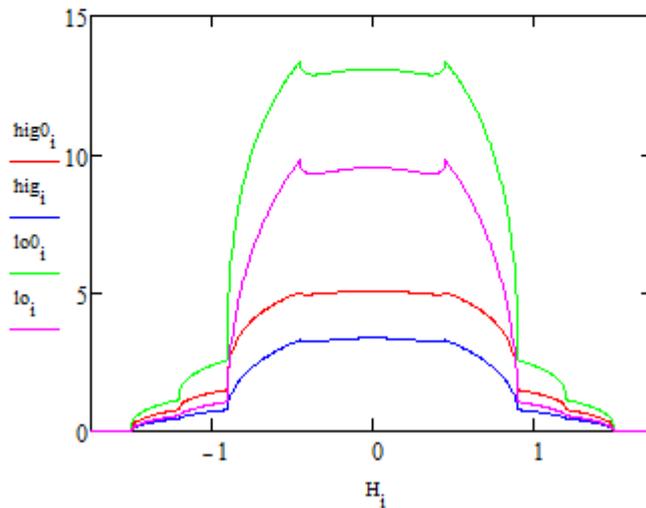
$$\rho_{fh_i} := \max\left(0, \text{root}\left(-\ln\left(\frac{\text{FN}(e2, \text{hsc}, H_i, \text{rh})}{\text{FN}(e2, \text{hsc}, -L, \text{qq})}\right) - \text{hma}, \text{rh}\right)\right)$$

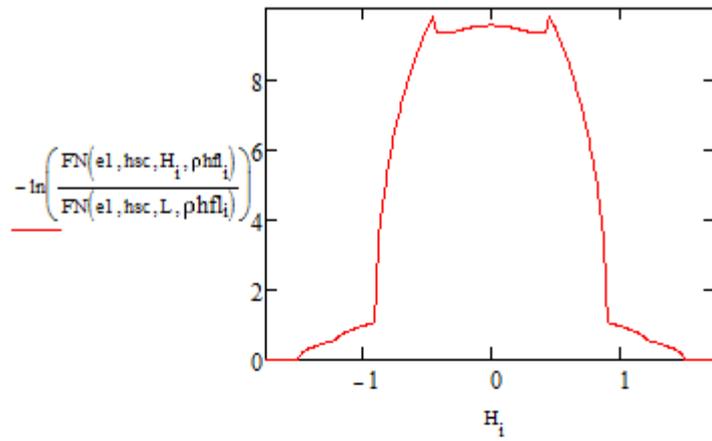


$$\text{hig}_i := -\ln\left(\frac{\text{FN}(e2, \text{hsc}, H_i, \rho_{fh_i})}{\text{FN}(e2, \text{hsc}, -L, \rho_{fh_i})}\right)$$

$$\text{lo}_i := -\ln\left(\frac{\text{FN}(e1, \text{hsc}, H_i, \rho_{fh_i})}{\text{FN}(e1, \text{hsc}, -L, \rho_{fh_i})}\right)$$

k := 1..4 max(ρfh) = 22.94282





RR := 10 M := 50 j := 1..M + 1

rr_{j,k} := 15 x := 142

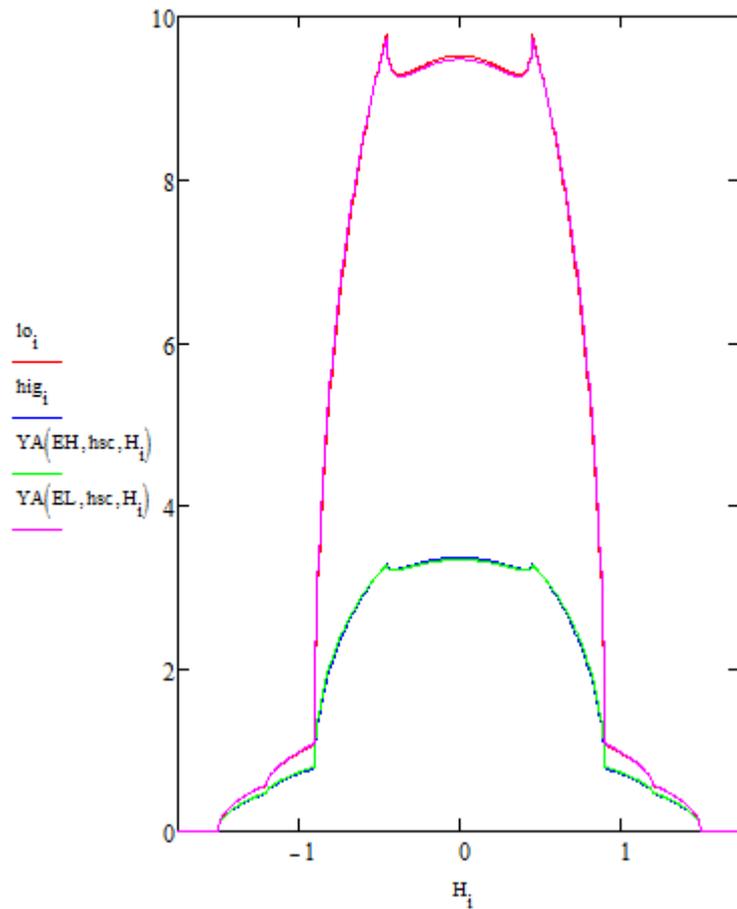
$$eh(x) := \sum_{i=1}^N (YA(x, hsc, H_i) - hig_i)^2$$

$$el(x) := \sum_{i=1}^N (YA(x, hsc, H_i) - lo_i)^2$$

EH := Minimize(eh, x) = 168.6476 EL := Minimize(el, x) = 91.39979

high_k := mas(EH, Z_k) low_k := mas(EL, Z_k)

eh(EH) = 0.24436 el(EL) = 0.91571



$$FF(aL, bL, aH, bH, \beta) := \sum_{k=1}^4 \left[[bL + aL \cdot (Z_k)^\beta] - low_k \right]^2 + \sum_{k=1}^4 \left[[bH + aH \cdot (Z_k)^\beta] - high_k \right]^2$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \\ \beta \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0.00003 \\ 0.14762 \\ 4.87675 \times 10^{-6} \\ 0.13121 \\ 2.90541 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \\ \beta \end{pmatrix} := \text{Minimize}(FF, aL, bL, aH, bH, \beta)$$

$$FF(aL, bL, aH, bH, \beta) = 0.00008$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \\ \beta \end{pmatrix} := \text{Minimize}(\text{FF}, aL, bL, aH, bH, \beta) \quad \text{FF}(aL, bL, aH, bH, \beta) = 0.00008$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \\ \beta \end{pmatrix} := \text{Minimize}(\text{FF}, aL, bL, aH, bH, \beta) \quad \text{FF}(aL, bL, aH, bH, \beta) = 0.00008$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.00003 \\ 0.1476 \\ 4.32274 \times 10^{-6} \\ 0.13121 \\ 2.89356 \end{pmatrix}$$

$$j := 1..M+1 \quad rrr_j := \frac{6(j-1)}{M}$$

$$\text{high}_{j,k} := \text{mas}(\text{EH}, Z_k) \cdot rrr_j \quad \text{low}_{j,k} := \text{mas}(\text{EL}, Z_k) \cdot rrr_j$$

$$B_{j,k} := rrr_j \quad A_{j,k} := B_{j,k} \cdot (Z_k)^\beta$$

$$\text{FF}(aL, bL, aH, bH) := \left[\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^4 \left[(aL \cdot \text{low}_{j,k} + bL \cdot \text{high}_{j,k} - A_{j,k})^2 + (aH \cdot \text{low}_{j,k} + bH \cdot \text{high}_{j,k} - B_{j,k})^2 \right] \right]$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 40747.76882 \\ -46105.84983 \\ -1.47211 \\ 9.36928 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \end{pmatrix} := \text{Minimize}(FF, aL, bL, aH, bH)$$

$$FF(aL, bL, aH, bH) = 1.89885 \times 10^7$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 40088.16973 \\ -45611.43063 \\ -1.47211 \\ 9.3693 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \end{pmatrix} := \text{Minimize}(FF, aL, bL, aH, bH)$$

$$FF(aL, bL, aH, bH) = 1.89885 \times 10^7$$

$$\begin{pmatrix} aL \\ bL \\ aH \\ bH \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 40088.16973 \\ -45611.43063 \\ -1.47211 \\ 9.36932 \end{pmatrix}$$

$$ALL_i := (aL \cdot lo_i + bL \cdot hig_i) \quad BLL_i := (aH \cdot lo_i + bH \cdot hig_i)$$

$$i := 1..N \quad \min(lo) = 0$$

$$Pr := \text{medsmooth}(BLL, 5) \quad PAr := \text{medsmooth}(ALL, 5)$$

$$vs := \text{cspline}(YY, Pr) \quad \max(lo) = 3.95747$$

$$vas := \text{cspline}(YY, PAr) \quad \min(lo) = 0$$

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

	1
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
lo = 8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	...

```

i := 1..N + 1
rrr_i := -L + i * (2*L / N)

Prrr_i := PrP(rrr_i)

Prr := medsmooth(Prrr, 5)

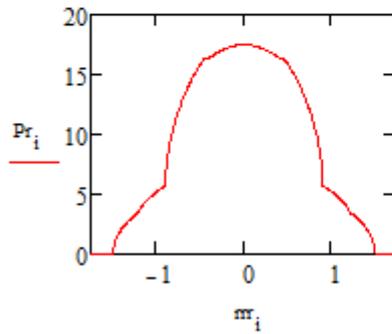
PA(z) := interp(vas, YY, PAr, z)

PrA(z) := d/dz PA(z)

i := 1..N + 1

rrr_i := -L + i * (2*L / N)

```



```

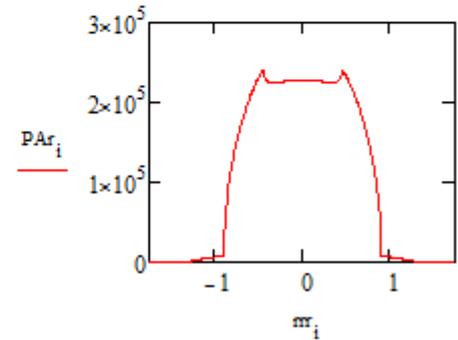
vbll := cspline(YY, Prr)
Br(z) := interp(vbll, YY, Prr, z)

```

```

vall := cspline(YY, PArr)
lo_i := YA(EL, hsc, H_i)

```



```

PArrr_i := PrA(rrr_i)
PArr := medsmooth(PArrr, 5)

```

```

Ar(z) := interp(vall, YY, PArr, z)
hig_i := YA(EH, hsc, H_i)

```

$$\text{Par}(rr) := \frac{-1}{\pi} \int_{|r|+0.00000001}^{L-0.00000001} \frac{\text{Br}(z)}{\sqrt{z^2 - rr^2}} dz$$

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

$$L = 1.75$$

$$i := 1..N+1$$

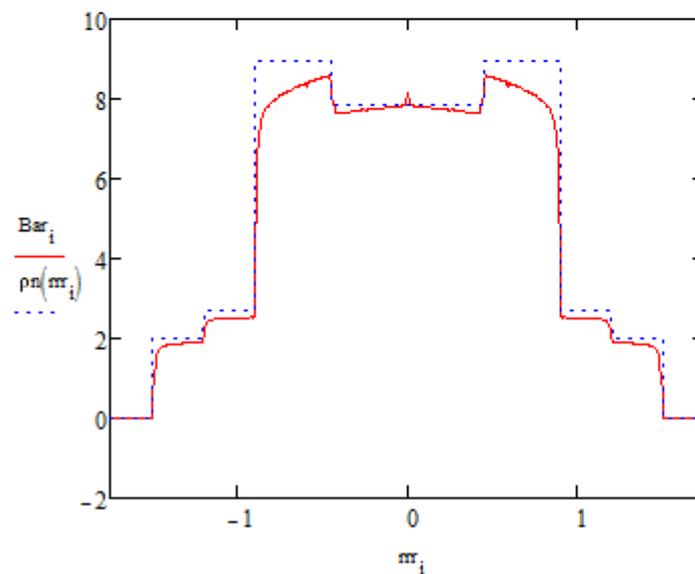
$$i := 1..N+1$$

$$rr_i := -L + (i-1) \cdot \frac{2L}{N}$$

$$rr_i := -L + (i-1) \cdot \frac{2L}{N}$$

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

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



$$\text{Bar}_1 := \text{Bar}_2$$

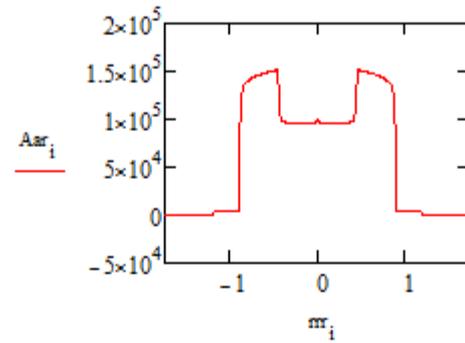
$$\text{Aar}_1 := \text{Aar}_2$$

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

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

$$i := 1..N+1$$

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



$$ZN_i := \begin{cases} \text{res} \leftarrow 0 & \text{if } |Bar_i| \leq 0.01 \\ \text{res} \leftarrow \left(\frac{|Aar_i|}{|Bar_i|} \right)^{\frac{1}{\beta}} & \text{otherwise} \\ \text{res} & \end{cases}$$

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

$$\min(Bar) =$$

augment(rrr, Z) =

	1	2
1	-1.75	0
2	-1.743	0
3	-1.736	0
4	-1.729	0
5	-1.723	0
6	-1.716	0
7	-1.709	0
8	-1.702	0
9	-1.695	0
10	-1.688	0
11	-1.682	0
12	-1.675	0
13	-1.668	0
14	-1.661	0
15	-1.654	0
16	-1.647	...

Bar =

	1
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	-2.27637·10 ⁻¹⁵
14	8.24744·10 ⁻¹⁵
15	-2.98929·10 ⁻¹⁴
16	...

	1
1	-1.75
2	-1.74316
3	-1.73633
4	-1.72949
5	-1.72266
6	-1.71582
7	-1.70898
8	-1.70215
9	-1.69531
10	-1.68848
11	-1.68164
12	-1.6748
13	-1.66797
14	-1.66113
15	-1.6543
16	...

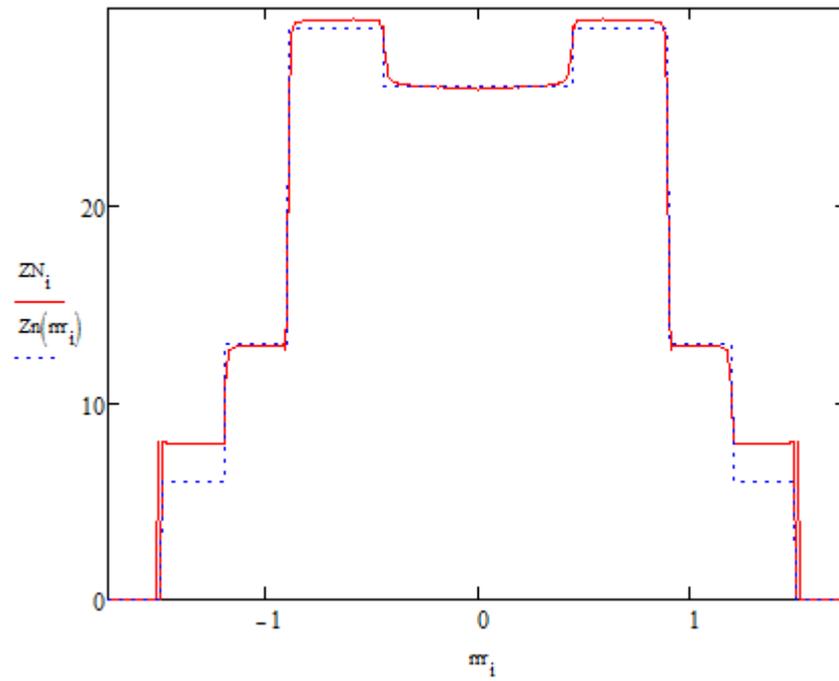
$\pi r =$

	1
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	...

$Z =$

	1
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	$1.50044 \cdot 10^{-15}$
9	$-5.42172 \cdot 10^{-15}$
10	$1.97434 \cdot 10^{-14}$
11	$-7.17189 \cdot 10^{-14}$
12	$2.60517 \cdot 10^{-13}$
13	$-9.43963 \cdot 10^{-13}$
14	$3.42003 \cdot 10^{-12}$
15	$-1.23959 \cdot 10^{-11}$
16	...

$Aar =$



$$\min(\text{Aar}) = -1.23329 \qquad \max(\text{Aar}) = 151712.7102$$

$$\min(\text{Bar}) = -0.00296 \qquad \max(\text{Bar}) = 8.6123$$

$$\min(\text{Z}) = 0 \qquad \max(\text{Z}) = 29.39665$$

$$i := 1..N + 1 \qquad j := 1..N + 1$$

$$xx_i := -L + (i - 1) \cdot \Delta \qquad yy_j := -L + (j - 1) \cdot \Delta$$

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

$$rrr_i := \left\lfloor \frac{\sqrt{(xx_i)^2 + (yy_i)^2}}{\Delta} \right\rfloor$$

$$\begin{pmatrix} \text{red}_{i,j} \\ \text{grn}_{i,j} \\ \text{blu}_{i,j} \end{pmatrix} := \begin{cases} \text{res} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } 5 \leq Zr_{i,j} \leq 10 \\ \text{res} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 255 \end{pmatrix} & \text{if } 10 \leq Zr_{i,j} \leq 18 \\ \text{res} \leftarrow \begin{pmatrix} 255 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } 19 \leq Zr_{i,j} \leq 28 \\ \text{res} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 255 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } 28.1 \leq Zr_{i,j} \leq 35 \\ \text{res} \leftarrow \begin{pmatrix} 128 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} & \text{if } Zr_{i,j} \leq 4.8 \vee Zr_{i,j} > 35 \\ \text{res} & \end{cases}$$

$$CI := \text{augment}(\text{red}, \text{grn}, \text{blu})$$

$$\text{WRITERGB}(\text{"Dual VKR 100+225+ color.bmp"}) := CI$$