# ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Журавский Евгений Евгеньевич

### ВНУТРИТРУБНАЯ КОМПТОНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ СТАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДОВ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

2.2.8 - Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"

#### Научный руководитель:

#### Чахлов Сергей Владимирович

К. ф.-м.н, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", заведующий лабораторией РКНЛ РКД

#### Официальные оппоненты:

#### Сырямкин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, профессор

#### Потрахов Николай Николаевич

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ИТЕП» им. В.И. Ульянова (Ленина)», заведующий кафедрой электронных приборов и устройств, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 16 сентября 2025 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, д.7, корпус 18, ауд. 215



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан / <u>2025 г.</u>

Ученый секретарь диссертационного совета ДС.ТПУ.13 к.т.н.

ler

Шевелева Е.А.

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

работы. Повысить Актуальность уровни безотказности, долговечности И эксплуатационной безопасности стальных магистральных нефтепродуктопроводов, в частности на опасных производственных объектах невозможно без применения комбинированных методов неразрушающающего контроля. Одним из из наиболее важных и значимых контролируемых параметров магистральных нефтепродуктопроводов является степень утончения стенок испытуемых трубопроводов, а также сварных швов, которое вызывается коррозионными, эрозионными и другими негативными процессами, приводящими к разрушению стенок трубопроводов. Одним из методов повышения эксплуатационной безопасности действующих магистральных стальных нефтепродуктопроводов является применения внутритрубного технического диагностирования, выполняемого с целью выполнения требований промышленной безопасности и выявления дефектов основного металла и сварных соединений на этапах Внутритрубное техническое диагностирование предполагает проведение эксплуатации. неразрушающего контроля изнутри трубпоровода при одностороннем доступе к его поверхности. Для выполнения внутритрубного технического диагностирования применяются следующие методы неразрушающего контроля: визуальный и измерительный, ультразвуковой (УЗК) и магнитный (МК). Каждый из применяемых методов имеет свою область применения в части выявления несплошностей сварных соединений. Так в таблице 1 представлена общая область применения каждого из методов:

Таблица 1 – Область применения видов (методов) контроля

Вид	Выявляемые	Предельная чувствительность		Не гарантиј	ует
конт	несплошности в			выявление или выявляет	
роля	основном металле и			слабо следую:	щие
	сварных соединениях			несплошности	
УЗК	Трещины, непровары,	Для толщин от 1,5 до 10 мм —составляет от 0,5 до 2,5 мм $^2$ Для толщин от 10 до 50 мм — составляет от 2,0 до 7,0 мм $^2$		Поверхностные	И
	поры, неметаллические			подповерхностные	
	и металлические			Сферические	И
	включения			цилиндрические	
MK	трещины, непровары	, непровары Поверхностные		Подповерхностные	И
				внутренние Сферичес	ские
		Ширина (раскрытие), мм	Глубина, мм	и цилиндрические	
		От 0,1 до 0,5	От 0,2 до 1,0		
		Подповерхностные			
		От 0,3 до 0,5	От 0,5 до 1,0		

Существующие методы внутритрубного диагностирования не обеспечивают должные уровни вероятностей обнаружения всех недопустимых дефектов в нефтепродуктопроводах, в частности газовых полостей и других включений. Для снятия отмеченных ограничений на практике предполагается применение, например, комптоновской гамма- и рентгеновской томографии, как метода радиационного контроля контроля работоспособного при одностороннем доступе к внутренним поверхностям трубопроводов с возможным существенным снижением

дозовых нагрузок в дополнение к сущесвующим ультразвуковым и магнитным методам внтуритрубной диагностики.

Тема диссертационных исследований является актуальной, так как значительная часть их выполнялась в рамках научно–исследовательских работ (договор №16.09-40/2019 от 28.01.2019 г. с ООО «Эксперт»), причём общий вектор этих исследований связан с технологиями предупреждения и развития опасных ситуаций, приводящим к авариям и катастрофам техногенного характера и безусловно относится к приоритетным направлениям и критическим технологиям в РФ. Возрастающее с каждым годом количество научных публикаций, ассоциированных с темой диссертационных исследований, также говорит о её важности и значимости.

Степень разработанности темы. Исследованиям методов радиационного контроля, основанных на комптоновском гамма- и рентгеновского обратном рассеянии, посвящены работы отечественных исследователей, например, Булатова Б.П., Андрюшина П.Ф., Капранова Б.И., Горбунова В.И. и других, а также зарубежных учёных Margret M, Kolkoori S, Jessica Kelley, Samir Abdul-Majid и других. В частности, достаточно полно изучены метод радиационного гамма- и рентгеновского контроля на основе оценки параметров комптоновском обратного рассеяния для материалов испытуемых изделий с эффективными атомными номерами Z, не превышающими 22, и плотностью, не превосходящей 2,7 г/см<sup>3</sup>. Для стальных изделий в литературе имеются многочисленные экспериментальные данные без должного теоретического обоснования. Например, в научной литературе рассматриваются далёкие от реальности приближенные геометрии задания параметров исходных и рассеянных пучков гамма- и рентгеновского излучения («точечные» пучки первичного и рассеянного излучения), уделяется мало внимания описанию реальных коллимационных систем, являющихся важнейшими составляющими систем радиационного контроля на комптоновском обратном рассеянии гамма- и рентгеновских квантов. По этой причине в научной литературе отсутствуют научно обоснованные корректные определения и методы расчёта реальных апертурных функций рассеивающих объёмов, что обуславливает необходимость восполнения данного пробела в теории и практике проектирования систем радиационного контроля на основе оценки параметров полей комптоновского рассеяния, трансформируемых объектами контроля из полей гамма- и рентгеновского излучения.

**Объект исследования**. Системы радиационного контроля на основе анализа полей комптоновского обратного рассеяния.

**Предмет исследования**. Системы радиационного контроля стальных нефтепродуктопроводов на комптоновском обратном рассеянии.

Цель работы. Разработать систему комптоновской гамма- и рентгеновской томографии

стальных нефтепродуктопроводов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1. Проанализировать проблемы оценки пространственного распределения плотности материала по объёму контролируемого объекта в условиях одностороннего доступа для материалов со средним атомным номером Z=26.
- 2. Исследовать параметры коллимационной системы для комптоновской гамма- и рентгеновской томографии стальных материалов.
- 3. Осуществить анализ закономерностей формирования радиационных сигналов от объема конечных размеров при сканировании объекта контроля в условиях одностороннего доступа при комптоновской гамма- и рентгеновской томографии.
- 4. Провести анализ математических методов реконструкции распределения плотности материала внутри объекта контроля методом комптоновской гамма- и рентгеновской томографии.
- 5. Исследовать возможности применения детектирующих систем для комптоновской гамма- и рентгеновской томографии.

#### Научная новизна диссертационных исследований:

- 1. Получены формулы для реальных апертурных функций рассеивающего объема с кольцевым детектором.
- 2. Получены формулы для определения параметров несплошностей при продольном сканировании щелевым коллиматором.
- 3. Установлено, что падение зондирующего пучка излучения под углом 45° при угле детектирования 90° предпочтительнее, с точки зрения формы рассеивающего объема и объемно–пространственной статистической неопределенности.
- 4. Разработан алгоритм выбора параметров пинхола первичного коллиматора коллимационной системы.

**Практическая значимость работы**. Разработанная система радиационного контроля на комптоновском обратном рассеянии, состоящая из: вольфрамовой коллимационной системы с первичным коллиматором в виде пинхола и щелевым вторичным коллиматором, блока сцинтилляционных детекторов ВGO и рентгеновского аппарата РАП-300-5, внедрена в лаборатории неразрушающего контроля для внутритрубного технического диагностирования магистральных стальных нефтепродуктопроводов диаметром 1220 мм с толщиной стенки 10 мм.

#### Методы исследований:

- 1. Методы теоретического исследования физические закономерности испускания, взаимодействия (поглощения, рассеяния) и регистрации гамма- и рентгеновского излучения;
  - 2. Методы математического моделирования;

- 3. Методы сравнительного анализа и классификации методов, технологий и средств неразрушающего контроля;
  - 4. Методы эмпирических исследований;
- 5. Аналитические и статистические методы обработки экспериментальных данных применительно к оценке и измерению характеристик полей обратно рассеянного гамма и рентгеновского излучения;
- 6. Подходы к измерению характеристик коллимационных систем гамма- и рентгеновских комплексов комптоновской томографии;
- 7. Методы сравнительного и сопоставительного анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований применительно к гамма- и рентгеновских комплексов комптоновской томографии.

#### Положения, выносимые на защиту:

- 1. Аналитические выражения для расчёта апертурных функций рассеивающих объёмов, в том числе и для кольцевых детекторов, позволяющие подобрать оптимальное соотношение размеров первичных и вторичных коллиматоров, а также вычислить углы сбора квантов, при нормальном падении зондирующих пучков излучения;
- 2. Выражения для выбора оптимальных значений размеров щелей первичных и вторичных коллиматоров с учетом деформации рассеивающего объема;
- 3. Предложены формулы для определения положения и размера несплошности при продольном сканировании щелевым коллиматором.
  - 4. Алгоритм определения предельно контролируемых толщин.

Достоверность полученных результатов обеспечивается систематическим характером исследования, воспроизводимостью полученных результатов моделирования и измерений, сравнением и сопоставлением с результатами исследований других авторов, использованием сертифицированного программного обеспечения.

Реализация результатов работы. Система комптоновской рентгеновской томографии может быть реализована для внутритрубной диагностики стальных магистральных нефтепродуктопроводов диаметром 1220 мм и толщиной стенки 10 мм. Получен патент на изобретение №2802253 (способ изготовления твердотельного изолятора для рентгеновского аппарата). промышленной безопасности.

**Апробация работы**. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских конференциях: Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 2019 г). Уральская конференция «Физические методы

неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» 2022г; Молодежная научно- техническая конференция РОНКТД 2022г. 4-я Практическая конференция по вопросам неразрушающего контроля NDT Russia 2023.

Публикации. Результаты работы опубликованы в 3 печатных работах, из которых 3 статьи в изданиях, включенных в список ВАК и индексированных в базе данных WoS (SCOPUS), а также в 3 тезисах докладов на всероссийских конференциях. Оформлен результат интеллектуальной деятельности. Патент на изобретение №2802253 (способ изготовления твердотельного изолятора для рентгеновского аппарата).

**Личный вклад автора**. Диссертационная работа представляет собой обобщение теоретических и экспериментальных исследований автора в области радиационного контроля на обратном Комптоновском рассеянии стальных объектов. В опубликованных работах автору принадлежит: проведение экспериментальных исследований по определению реальных апертурных функций рассеивающего объема, томографии образцов, оценки возможности применения систем сканирования; анализ, интерпретация и обобщение результатов экспериментов; сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Структура и объем работы**. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка используемой литературы, содержащего 71 источников. Общий объем диссертации составляет 111 страниц и включает 63 рисунков, 6 таблицы и 59 формулы, 1 приложение.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность и степень разработанности темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены основные результаты, определяющие её научную новизну и практическую ценность.

**В первой главе** проведен анализ существующих исследований по методу радиационного контроля на комптоновском обратном рассеянии. Проведен патентный анализ по тематике исследования.

На основе проведенного анализа установлено, что малоизученной областью является применение дефектоскопии и толщинометрии на комптоновском обратном рассеянии для действующих нефтепродуктопроводов, в частности, в области выбора и оценки параметров разрабатываемой системы. Исследования, проведенные в Индии и Саудовской Аравии, направлены преимущественно на оценку возможности применения толщинометрии на комптоновском обратном рассеянии для действующих нефтегазопроводов с учетом тех средств неразрушающего контроля, которые имеются в наличии. Из чего следует, что толщинометрия, и, в частности, дефектоскопия стальных нефтегазопроводов является достаточно перспективной задачей. Наиболее полно описаны исследования для изделий с атомным номером Z<22 и плотностью 2,7 г/см³. Исследования коллимационных систем (КС) для стальных изделий с атомным номером Z=26 отсутствуют.

**Во второй главе** дана краткая характеристика основных процессов взаимодействия рентгеновского и гамма-излучения с веществом.

Приведены оптимальные значения зондирующего излучения для контроля железа с монохроматическим источником и с источником непрерывного спектра. Установлено, что в случае использования монохроматического излучения оптимальная энергия излучения зависит главным образом от контролируемой толщины и должна выбираться исходя из заранее известной толщины объекта. Максимум интенсивности обратно-рассеянного излучения в случае источника с непрерывным спектром – неявный. Оптимальное напряжение на рентгеновской трубке зависит от материала предварительного фильтра рентгеновской трубки, вследствие чего ужесточение рентгеновского излучения приводит к уменьшению значения оптимального напряжения на рентгеновской трубке, но также приводит и к уменьшению интенсивности рентгеновского излучения за счет фильтрации. Учитывая, что, непрерывный спектр рентгеновского излучения от анода трубки зависит, в частности, от материала предварительного фильтра — оптимизация напряжения на рентгеновской трубке должна проводиться в каждом отдельном случае.

Проведен анализ схем формирования рассеивающего объема для системы с подвижным

первичным коллиматором и с неподвижным первичным коллиматором в комбинации с кольцевым детектором. Установлено, что форма рассеивающего объема зависит от соотношения размеров первичного (a) и вторичного (b) коллиматора, а также от угла детектирования (a).

Впервые определена формула апертурной функции рассеивающего объема для кольцевого детектора при нормальном падении пучка рентгеновского или гамма излучения и при падении под углом 45°.

Установлено, что по мере углубления рассеивающего объема в объект контроля, объемнопространственная статистическая неопределенность увеличивается вследствие деформации самого рассеивающего объема.

Проведено численное моделирование взаимодействия ионизирующего излучения с

железом для различных вариантов геометрии, а также размеров первичного и вторичного коллиматоров. В ходе моделирования вычислялось: количество квантов, попавших в детектор после однократного рассеяния в барьере (сигнал); количество квантов, попавших в детектор после двух и более актов рассеяния (шум); отношение числа однократно-рассеянных квантов к числу многократно-рассеянных (отношение сигнал/шум); спектры однократно рассеянного излучения и многократно рассеянного излучения. Общее количество квантов, попавших в детектор, принято равным  $10^6$ , при соответствующей погрешности  $\frac{1}{\sqrt{N}} = 0.1\%$ . Количество многократно рассеянных квантов с ростом глубины залегания рассеивающего объема экспоненциально уменьшается, но с показателем экспоненты меньшим, чем для однократно рассеянных квантов. Отношение сигнал/шум с ростом глубины залегания рассеивающего объема уменьшается экспоненциально. Отношение сигнал/шум широкого пучка несколько выше, чем для радионуклидных источников, но, начиная с глубины залегания рассеивающего объема 7-8 мм ситуация обратная. Данный факт связан с фильтрацией многократно рассеянного излучения с ростом глубины. Несмотря на неудовлетворительные значения отношения сигнал/шум, начиная с глубины залегания рассеивающего объема 5 мм для любых источников, возможно применение ряда методов для повышения отношения сигнал/шум. Спектр рассеянного излучения из рассеивающего объема для широкого пучка принципиально похож, независимо от напряжения на трубке. Максимумы спектров однократно и многократно рассеянного излучения для широкого пучка, независимо от угла падения зондирующего пучка излучения, лежат в одних областях энергий. Спектры однократно и многократно рассеянного излучения цезия—137 при нормальном падении и при падении под углом  $\theta$  отличаются между собой. Спектр многократно рассеянного излучения в случае нормального падения зондирующего пучка излучения уже, чем для падения под углом  $\theta$ .

**В третье главе** приведены экспериментальные исследования коллимационной системы, способов сканирования и их результаты.

Проведено экспериментальное определение зоны чувствительности блока детекторов. Для повышения эффективности сбора обратно-рассеянного излучения каждый детекторный элемент растягивается в линию по x, детектор превращается в матрицу, состоящую из линеек по оси x. Тогда координата по оси z определяется номером линейки m. Стандартная система – сбор света с обоих концов каждого кристалла на один фотоэлектронный усилитель (ФЭУ). Подобная конструкция применяется в томографе ComScan—160. Основной её недостаток: – затухание света от точки сцинтилляции до торца кристалла; несоответствие спектра сцинтилляции кристалла спектральной чувствительности ФЭУ. В данной работе Wavelength shifting (WLS)— вклеивалось внутрь кристалла оптическим клеем, волокно практически со 100%—й эффективностью собирает свет от сцинтилляций в каждой точке кристалла. Блок детекторов КС состоит из 2 матриц детекторов Bismuth Germanate – BGO

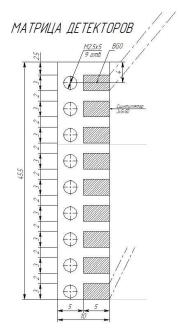


Рисунок 1 – Матрица детекторов

В каждой матрице расположено 9 сцинтилляторов ВGO размером 2,5х5х50 мм. Расположение сцинтилляторов в матрицах отличается друг от друга. Сцинтилляторы смещены относительно друг друга по высоте на 2,5 мм. В разработанной конструкции КС обратнорассеянное излучение собирается в пределах ширины раскрытия пучка излучения от трубки, составляющей 40°, что обеспечивает достаточно малую неоднородность интенсивности излучения на участке шириной 50 мм. Это и определяет длину кристаллов.

Для определения распределения интенсивности обратно рассеянного излучения по высоте расположения сцинтилляторов металлическая пластина устанавливается на различной высоте зоны чувствительности БД. Для каждого детектора подбирается такое положение металлической

пластины, при котором значение интенсивности обратно рассеянного излучения на детекторе будет максимальным. Результаты измерений показывают, что геометрическое ослабление по высоте расположения кристаллов составляет почти 10 раз, что в свою очередь необходимо учитывать аппаратно.

На результаты измерений интенсивности обратно рассеянного излучения влияет аппаратная и статистическая погрешность. Значение аппаратной погрешности определяется стабильностью работы рентгеновского аппарата и измерительной схемы блока детекторов (БД) Статистическая погрешность определяется флуктуациями при формировании обратно рассеянного излучения, и не зависит от аппаратной составляющей. Суммарная погрешность определяется как  $\delta = \sqrt{\delta_{cm}^{\ \ 2} + \delta_{an}^{\ \ 2}}$ , где  $\delta_{\rm cr}$  – статистическая составляющая погрешности,  $\delta_{\rm an}$  – аппаратная составляющая погрешности.

Система сцинтилляционных детекторов (кристалл BGO и ФЭУ) БД должна вырабатывать сигнал только при наличии рентгеновского излучения, рассеянного от контролируемого изделия. Реально в каждый детектор вносятся помехи, связанные с двумя факторами:

- 1) оптическая засветка ФЭУ по системе передачи света от кристалла к ФЭУ;
- 2) рентгеновская подсветка кристалла, связанная с прохождением прямого излучения от трубки через защиту и рассеянного излучения от элементов конструкции БД.

Для исключения влияния постороннего света разработана конструкция световода и оптического разъема позволяющая полностью исключить оптическую засветку. Конструкция обеспечивает защиту от внешнего света до уровня <4,5 мВ, при темновом сигнале ФЭУ порядка 30 мВ. На входном конце световода защита от постороннего света обеспечивается черной пластиковой обоймой с отверстиями Ø2 мм.

Для исключения рентгеновской подсветки корпус излучателя закрывался свинцом толщиной 27 мм в направлении выхода излучения от трубки и 5 мм свинца для защиты от рентгеновского излучения, выходящего в бока и торцы излучателя. Разработанная конструкция радиационной защиты обеспечивает уровень защиты не хуже 10% от уровня полезного сигнала.

Следующая составляющая аппаратной погрешности вызвана стабильностью работы рентгеновского аппарата. Рентгеновский аппарат не обеспечивает "идеально" однородную дозу излучения, вследствие чего, интенсивность обратно рассеянного излучения несколько изменяется во времени. Для определения аппаратной погрешности в течение 1 минуты, однородная металлическая пластина облучается рентгеновским излучением. Аппаратная погрешность составляет 0,8 мВ, то есть не более 2% от исходного сигнала.

Экспериментально установлена предельная контролируемая толщина железа. При увеличении толщины контролируемого изделия, интенсивность обратно рассеянного излучения

от рассеивающего объема, расположенного в верхней границе изделия, экспоненциально уменьшается. Сигнал от металлической пластины является информативным, если измеренная интенсивность обратно рассеянного излучения больше, чем погрешность  $\delta$ . При достижении значения интенсивности обратно рассеянного излучения погрешности  $\delta$ , считается, что достигнута предельно возможная контролируемая толщина 10 мм.

Проведено исследование способов сканирования. Выделены три способа сканирования:

- 1. Сканирование перемещающимся пинхолом;
- 2. Сканирование неподвижным пинхолом;
- 3. Сканирование щелевым коллиматором.

При реализации способа сканирования с перемещающимся "пинхолом", к пинхолу предъявляется ряд требований. Конструкция пинхола должна обеспечивать постоянное значение поперечного сечения для всех углов наклона. Т.е. поперечное сечение рабочего пучка рентгеновского излучения для каждого угла наклона должно быть одинаковым. При данном условии пространственно-статистическая неопределённость, в зависимости от угла наклона рабочего пучка рентгеновского излучения, будет постоянной. Также требованием к пинхолу является 100% ослабление интенсивности рабочего пучка за стенками пинхола. Результаты показывают, что при выбранной геометрии пинхола отклонение оси пучка на  $\pm 8,72\%$  вызывает отклонение интенсивности излучения не более 11%. Это обеспечивает возможность аппаратной или программной коррекции уровней сигналов в системе. Разница между максимальным уровнем сигнала  $I(\alpha)$  и минимальным составляет 20%.

Применение способа сканирования с щелевым коллиматором не предполагает "пинхол", определение положения и размеров несплошностей основано на их зависимости от уровня сигнала с сцинтиллятора и на разности уровня сигналов между двумя сцинтилляторами.

Рассмотренная схема с двумя одинаковыми детекторами, между которыми находится тонкая, непрозрачная для видимого света перегородка представлена на рисунке 2. При взаимодействии коллимированного излучения с ОК формируется поток обратно рассеянного излучения, коллимированного щелевым коллиматором детектора. Примем, что число рассеянных фотонов, вылетающих из ОК, пропорционально L. При наличии в ОК какой-либо несплошности, примем сигнал от неё равным нулю.

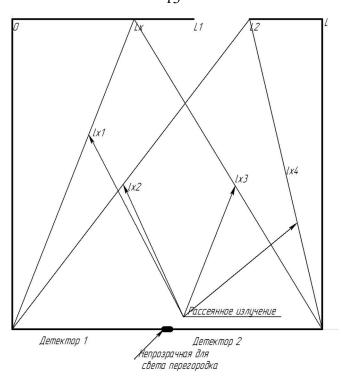


Рисунок 2 — Схема с двумя детекторами (*lx* приведена с индексами для примера визуализации)

Так как эмиссионный источник представляет собой линейный источник длиной L, то каждая точка источника, расположенная на расстоянии Lx от начала координат, излучает под некоторым, заранее заданным геометрией КС углом  $\theta$ , равновероятно в направлении детектора. Обратно рассеянное излучение, рассеянное из точки источника, расположенной на расстоянии Lx, будет проходить разный путь до каждой точки одного из детекторов. Установлена зависимость расстояния lx от Lx и x, где x — расстояние от нуля до отдельно выбранной точки на одном из детекторов

$$lx(Lx,x) = \sqrt{x^2 - 2\cdot Lx\cdot x + \left(H^2 + Lx^2\right)},\tag{1}$$

где H – перпендикуляр от эмиссионного источника до линейки детекторов.

Далее получим зависимость интенсивности излучения  $I \Delta x$  для каждого элемента детектора:

$$I\Delta x(x) = \int_{0}^{L} \frac{1}{lx(Lx,x)^{2}} dLx = \int_{0}^{L} \frac{1}{x^{2} - 2\cdot Lx\cdot x + (H^{2} + Lx^{2})} dLx.$$
 (2)

Проинтегрировав правую часть уравнения (2), получим:

$$I\Delta x(x) = \frac{\arctan\left(\frac{x}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{L - x}{L \cdot a}\right)}{L \cdot a}.$$
 (3)

где:  $\alpha = \frac{H}{L}$ .

Рассмотрим случай, когда в каком-либо месте эмиссионного источника отсутствует рассеиватель, то есть существует некоторая несплошность. На рисунке 3 границы такой несплошности обозначены символами L1 и L2, соответственно, длина несплошности будет равна  $L_n$ 

$$L_n = L2 - L1. \tag{4}$$

Итоговое уравнение интенсивности излучения  $In\Delta x$  с несплошностью выглядит следующим образом:

$$In\Delta x \left(L1, L_n, x\right) = \frac{\arctan\left(\frac{x}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{L - x}{L \cdot a}\right) - \arctan\left(\frac{x - L1}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{x - \left(L1 + L_n\right)}{L \cdot a}\right)}{L \cdot a}.$$
 (5)

Рассмотрим уравнение (4), которое представляет собой зависимость суммарного сигнала двух детекторов от положения и размера несплошности Is:

$$Is\left(L1, L_{n}, x\right) = \frac{1}{L \cdot a} \left[ \int_{0}^{L} \arctan\left(\frac{x}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{L - x}{L \cdot a}\right) - \arctan\left(\frac{x - L1}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{x - (L1 + L_{n})}{L \cdot a}\right) dx \right]$$

$$(6)$$

Проанализировав уравнение (6), можно установить, что значение суммарного сигнала с двух детекторов незначительно зависит от положения несплошности. Основной вклад в величину сигнала вносит размер несплошности. Вследствие этого уравнение (5) можно упростить, приняв L1 равной нулю:

$$Is(L_n,x) = \frac{1}{L \cdot a} \left[ \int_0^L \arctan\left(\frac{L-x}{L \cdot a}\right) - \arctan\left(\frac{L_n-x}{L \cdot a}\right) dx \right]. \tag{7}$$

Откуда следует, что, зная параметры КС, можно вычислить размер несплошности по уравнению (7).

Рассмотрим следующее уравнение (8), которое представляет собой разность сигналов с детекторов  $\Delta S$ :

$$\Delta S = \int_{0}^{L/2} In\Delta x(x) dx - \int_{L/2}^{L} In\Delta x(x) dx \qquad . \tag{8}$$

Подставив значение  $L_n$ , определенное согласно уравнению (4), в уравнение (7), и, решив его численными методами, можно определить положение несплошности.

На рисунке 3 изображен альбедный дефектоскоп с рентгеновским аппаратом (РА) РАП-300-5.

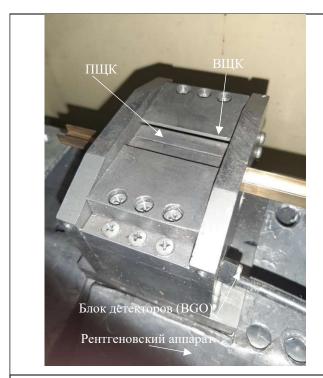






Рисунок 3б – алюминиевая пластина

Алюминиевая пластинка с искусственными несплошностями (рисунок 36) в виде отверстий и засверловок перемещалась над ПЩК продольно. Использовался сцинтилляционный детектор ВGO. При облучении РА алюминиевой пластинки измерялся суммарный сигнал с детекторов, а также разность сигналов детекторов. Время измерения на один кадр составило 0,3 секунды, шаг сканирования 0,1 мм. В ходе проведения сканирования и промежуточных программных преобразований получены результаты, представленные на рисунке 4.

Как видно из результатов положение и размер неслошностей соответствует положению реальных несплошностей на пластине. Размер несплошностей в случае отверстий соответствует реальным размерам, а размер засверловок – нет. Данный факт объясняется зависимостью уровня сигнала от размера несплошности, засверловка расположена на определенной глубине в образце, соответственно и поток обратно рассеянного излучения будет больше, откуда и меньший размер по сравнению с реальным размером несплошности. С увеличением числа кадров контур несплошностей определяется более чётко, вследствие уменьшения случайной погрешности измерения (за счёт статистического накопления.)

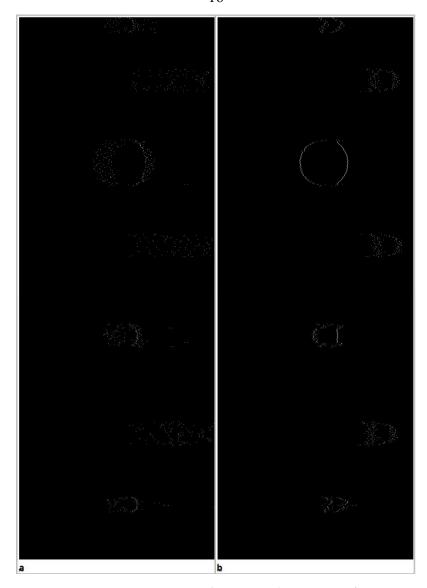


Рисунок 4 — Восстановленное изображение (а — 1 кадр, b — 100 кадров)

Проведено исследование апертурной функции рассеивающего объема (АФРО) КС с кольцевым детектором.

Вследствие того, что заранее, без предварительных экспериментов, действительная АФРО однозначно неизвестна, стальная пластинка с пропилами облучалась рентгеновским излучением. Полученный профиль сигнала представлен на рисунке 5

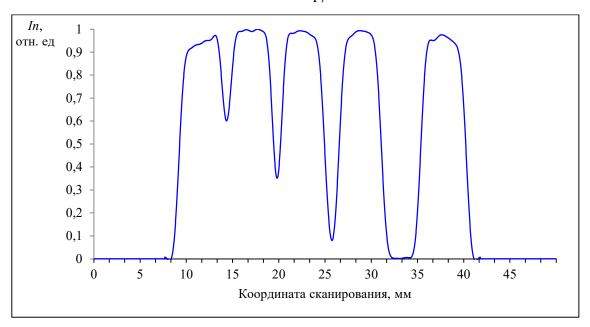


Рисунок 5 — Профиль сигнала *In* от стальной пластины

Переход АФРО через границу объекта осуществляется вдоль оси сканирования x, в результате физического взаимодействия апертуры рассеивающего объема (РО) с объектом образуются кванты рассеянного излучения из области геометрического перекрытия апертуры и объекта. Удельный выход фотонов из каждой области РО пропорционален электронной плотности объекта в этой области. Из чего следует, что общее число квантов, вышедшее из области геометрического перекрытия, пропорционально интегралу по площади перекрытия РО и плотности объекта  $\rho(x,y)$ , то есть

$$F_1(x) = 2\int_0^{xt} \Phi(x - xt) \cdot \rho(xt) dxt, \qquad (9)$$

где: 
$$\int_{0}^{xt} \Phi(x-xt)$$
 — АФРО  $\Phi_{I}(x)$  или  $\Phi_{2}(x)$  соответственно.

Применив преобразование Фурье к (1) и лемму Бореля о свертке получим

$$h(\omega) = \frac{U(\omega)}{\rho(\omega)}. (10)$$

Применив обратное преобразование Фурье получим

$$h(xt) = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{U(\omega)}{\rho(\omega)} e^{(-j\omega xt)} d\omega.$$
 (11)

Для определения АФРО КС рассмотрим область, соответствующую переходу РО через пропил шириной 5 мм. Для того чтобы найти АФРО, необходимо геометрически сопоставить функцию сигнала от образца U(x) и теоретическое изменение плотности  $\rho(x)$  рисунок 6.

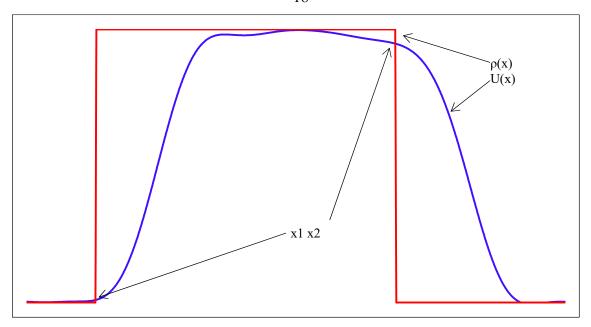


Рисунок 6. - АФРО

Результатом свертки является некая третья функция, приращение которой начинается с взаимного пересечения двух функций. Вследствие того, что значение функции U(x) в отличие от  $\rho(x)$  отлично от нуля в любой точке, необходимо задать граничные условия, — при каком изменении функции U(x) будем считать, что РО начинает пересекать  $\rho(x)$ . Для этого воспользуемся следующей приближенной методикой. Координата начала изменения  $\rho(x)$  будет определяться следующим значением:  $x_1 = \frac{1}{10} \frac{dU}{dx}$ , где  $\frac{dU}{dx}$  — максимальное значение функции; координата конца изменения  $\rho(x)$   $x_2$  определяется аналогично, но только с обратным знаком.

Итоговая АФРО представлена на рисунке 7. Спектр АФРО имеет высокочастотную составляющую. На рисунке 7 приведен нефильтрованный АФРО, и АФРО с фильтрацией высокочастотной составляющей спектра.

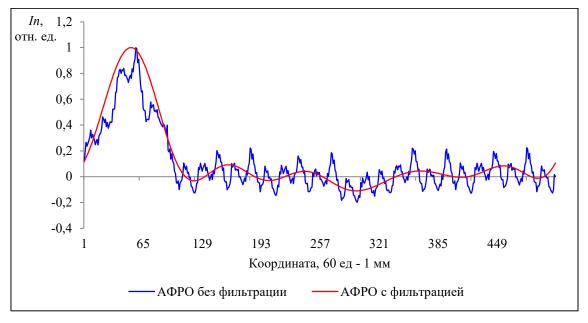


Рисунок 7- АФРО

Форма АФРО сопоставима с формой геометрического и действительного АФРО. Ширина АФРО равна двум диаметрам пинхола первичного коллиматора, вследствие вклада многократно рассеянного излучения. Восстановим функцию  $\rho(x)$  по сигналу от стального объекта применяя фильтрованную и не фильтрованную АФРО рисунок 8.

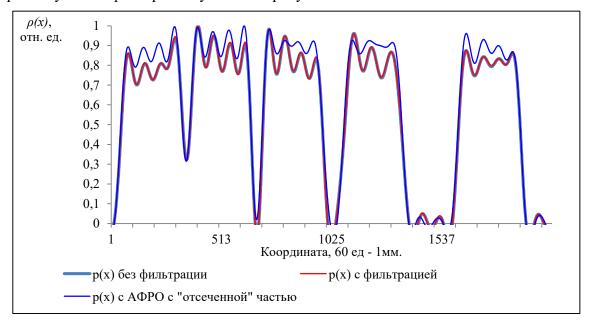


Рисунок 8 – функция распределения плотности  $\rho(x)$ 

По реконструкции видно, что форма функции распределения плотности сопоставима с реальным образцом. Не нулевое значение плотности для пропила 0,6 мм обусловлено недостаточно малым шагом сканирования, а также действительной шириной АФРО. Также видно, что восстановленное распределение плотности практически не меняется как для фильтрованного АФРО, так и нефильтрованного. Изменение функции  $\rho(x)$  происходит только при обнулении высокочастотной составляющей АФРО.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ диссертационных исследований позволил выделить ряд основных результатов и сформулировать наиболее значимые выводы.

- 1. Разработана коллимационная система с подвижным первичным коллиматором "пинхолом" размером 1 мм и вторичным щелевым коллиматором размером 1 мм, позволяющая проводить сканирование при применении рентгеновского аппарата РАП-300-5 с напряжением на аноде 270 кВ в пределах 50 мм при фокусном расстоянии 163 мм до 10 мм толщины стали с выявляемостью несплошности 1,5х1,5х1,0 мм³ на глубине 10 мм, при изменении поперечного размера рабочего пучка излучения не более 15% и разнице между максимальным уровнем интенсивности и минимальным не более 11%, сохраняя при этом удовлетворительные значения объёмно-пространственной статистической неопределенности.
- 2. Получены математические выражения АФРО для кольцевого детектора, позволяющие подобрать оптимальное соотношение размеров первичного и вторичного коллиматора, а также угол сбора квантов, при нормальном падении зондирующего пучка излучения.
- 3. Коллимационная система с щелевым коллиматором позволяет проводить сканирование производительнее, по сравнению с коллиматором в виде "пинхола". В то же время для такой системы положение несплошности определяется с большей точностью чем её размер, так как положение зависит от разности сигналов детекторов.
- 4. Основное влияние на объемно-пространственную статистическую неопределенность оказывает величина первичного коллиматора при нормальном падении зондирующего пучка излучения. Падение зондирующего пучка излучения под углом 45° является предпочтительным, с точки зрения формы рассеивающего объема и объёмно—пространственной статистической неопределенности.
- 5. Вследствие деформации рассеивающего объема по мере увеличения глубины залегания, размер вторичного коллиматора необходимо увеличивать.
- 6. Установлено, что зондирование с помощью радионуклидного источника является предпочтительным, так как его спектр достоверно известен, спектр же источника с непрерывным спектром, трудно однозначно определить заранее, еще более трудную задачу представляет собой определение спектра обратно-рассеянного излучения от источника с непрерывным спектром. Тем самым можно повысить отношение сигнал/шум путем применения радионуклидного источника Цезий-137 и проведением спектрометрии, так для нормального падения ширина спектра рассеянного излучения оказывается заметно уже, чем для спектра рассеянного излучения при угле падения зондирующего пучка излучения 45°.

#### Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Публикации в изданиях из базы данных WoS

- 1. Article Zhuravskiy, E. E., Belkin, D. S., Kapranov, B. I., & Chakhlov, S. V. (2020). Analysis of the Aperture Function of the Scattering Volume of the Collimation System of the Scattering Computed Tomography of Steel Products with a Ring Detector. Russian Journal of Nondestructive Testing, 56(6), 506-515.
- 2. Article Zhuravskii, E. E., Kapranov, B. I., Belkin, D. S., Chakhlov, S. V., & Shtein, A. M. (2020). Calculating parameters of pinhole in collimation system of albedo computed tomography of steel products. Russian Journal of Nondestructive Testing, 56, 171-178.).
- 3. Article Zhuravskiy, E. E., Belkin, D. S., Kapranov, B. I., & Chakhlov, S. V. (2024). Determination of position and size of non-flaws at albedo flaw detection. Russian Journal of Nondestructive Testing, 60(4), 440-445.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

- 1. Статья Журавский, Е. Е., Белкин, Д. С., Капранов, Б. И., & Чахлов, С. В. (2020). Анализ апертурной функции рассеивающего объема коллимационной системы альбедной компьютерной томографии стальных изделий с кольцевым детектором. Дефектоскопия, (6), 40-50.
- 2. Статья. Журавский, Е. Е., Капранов, Б. И., Белкин, Д. С., Чахлов, С. В., & Штейн, А. М. (2020). Расчет параметров пинхола коллимационной системы альбедной компьютерной томографиии стальных изделий. Дефектоскопия, (2), 42-49.
- 3. Статья. Журавский Е.Е., Белкин Д.С., Капранов Б.И., Чахлов С.В. (2024) Определение положения и размеров несплошностей при альбедной дефектоскопии. Дефектоскопия, (4), С. 38-44.

## Основные результаты диссертационной работы представлены в виде тезисов на конференциях:

- 1. Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 2019 г).
- 2. Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» 2022г;
- 3. Молодежная научно- техническая конференция РОНКТД 2022г.
- 4. 4-я Практическая конференция по вопросам неразрушающего контроля NDT Russia 2023.