

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

На правах рукописи

Назаренко Светлана Юрьевна

**РАСПОЗНАВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ
МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЭНДВИЧ-
ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Удод Виктор Анатольевич

Томск – 2024

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ДОСМОТРОВЫХ СИСТЕМ.....	12
1.1 Рентгеновские системы досмотра транспортных средств и грузов.....	14
1.2 Системы досмотра багажа и ручной клади.....	22
1.3 Выводы.....	31
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЗРАЧНОСТЕЙ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	32
2.1 Математическая модель выходных сигналов сэндвич-детектора излучения.....	32
2.2 Математическая модель радиационных прозрачностей объекта контроля для сэндвич-детектора рентгеновского излучения.....	35
2.3 Математическая модель радиационных прозрачностей объекта контроля для сэндвич-детектора излучения с учетом статистической зависимости его выходных сигналов.....	38
2.4 Исследование зависимости между выходными сигналами сэндвич-детектора рентгеновского излучения.....	42
2.5 Оценка коэффициента корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора для различных тестовых объектов контроля.....	44
2.6 Выводы по главе 2.....	50
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ, СОДЕРЖАЩЕЙ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	51
3.1 Описание алгоритма.....	51
3.2 Пример использования алгоритма.....	56
3.3 Выводы к главе 3.....	75
ГЛАВА 4. АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	77
4.1 Алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов по критерию минимума погрешности оценки эффективного атомного номера методом дуальных энергий.....	77
4.2. Оптимизация параметров сэндвич-детекторов излучения при использовании радиационно-чувствительных элементов первых детекторов из иодида цезия.....	83
4.3. Оптимизация параметров сэндвич-детекторов излучения при использовании радиационно-чувствительных элементов первых детекторов из оксисульфида гадолия... 108	108

4.4. Оптимизация параметров сэндвич-детекторов излучения при использовании радиационно-чувствительных элементов первых детекторов из селенида цинка.....	122
4.5. Оптимальный выбор значений параметров сэндвич-детекторов излучения.....	136
4.6 Выводы по главе 4	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	142
ПРИЛОЖЕНИЕ А	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия стала актуальной задача развития и совершенствования условий обеспечения транспортной безопасности в сфере воздушного и железнодорожного транспорта, а также защиты граждан в местах скопления большого количества людей, таких как правительственные здания, суды, пенитенциарные заведения, стадионы и места проведения крупных мероприятий.

Сканирующие системы цифровой рентгенографии (ССЦР) широко распространены и применяются для контроля материалов и изделий, выявления дефектов и технической диагностики. Принцип действия ССЦР состоит в том, что объект контроля (ОК) в процессе своего перемещения через сканирующую установку, просвечивается веерным пучком рентгеновского излучения, а система детекторов регистрирует прошедшее через ОК излучение.

Метод дуальных энергий (МДЭ) используется для распознавания материалов в ССЦР при проведении инспекционного контроля, направленного на обеспечение безопасности перевозок и пресечение попыток контрабанды нелегальных товаров. С помощью МДЭ можно выполнить оценку одновременно двух параметров ОК: 1) эффективного атомного номера (ЭАН) материала ОК; 2) массовой толщины ОК. Такая оценка выполняется путем решения системы из двух уравнений относительно этих параметров. Система уравнений представляет собой равенства теоретических и экспериментальных радиационных прозрачностей ОК для двух различных максимальных или эффективных энергий рентгеновского излучения.

Принимая во внимание многофункциональность использования ССЦР с сэндвич-детекторами излучения, закономерно возникает задача оценки потенциальной точности МДЭ, используемого в ССЦР для определения материалов досматриваемых объектов на основании их эффективного атомного номера. Это требует проведения исследований, направленных на оптимальный выбор значений основных параметров сэндвич-детекторов рентгеновского

излучения по критерию минимума погрешности оценки эффективного атомного номера, соответствующего распознаваемому материалу.

Степень разработанности темы. Основам метода дуальных энергий с регистрацией рентгеновского излучения сэндвич-детекторами посвятили свои работы Alvarez R.E., Seibert J.A., Rebuffel V., Dinten J.M. Kim H.K., Youn H., Kam S. B и другие.

Исследованию высокоэнергетических реализаций МДЭ, основанных на декомпозиции массового (либо линейного) коэффициента ослабления излучения на составляющие, соответствующие эффекту Комптона и эффекту рождения пар, посвящены работы Осипова С. П., Чахлова С.В., Штейна А.М., Ван Я., Чинь В.Б. и др.

Различные аспекты математического и имитационного моделирования систем радиографии с сэндвич-детекторами рассматривали Fredenberg E., Kim D.W., Kim H.K., Youn H., Shaw C. C., Gur D. B и другие.

Вопросам оценки эффективного атомного номера методом дуальных энергий с регистрацией рентгеновского излучения сэндвич-детекторами посвятили статьи Рыжиков В.Д., Найдёнов С.В., Ополонин А.Д., Neagu M., Mateiasi G., Li L., Zhang S., Russo P. Martz H.E. и другие.

Методологические, метрологические и алгоритмические подходы, связанные с проектированием и применением радиографических багажных систем с сэндвич-детекторами с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий, представили в своих работах Галкин С., Dului O., Knoll G.F., Macdonald R.D.R., Cho G., Slavashovich I., Pozdnyakov D., Kasiuk D., Linev V., Wells K., Bradley D.A., Speller R. и другие.

Использованию рентгеновских томографов с сэндвич-детекторами с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий уделили внимание Iovea M., Dului O.G., Faby S., Sawall S., Shaqdan K.W., Abujudeh H.H., Park C.M. и другие.

Сканирующая цифровая рентгенография с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий является действенным методом

обнаружения потенциально опасных фрагментов в багаже и ручной клади, так как позволяет оценить эффективный атомный номер материалов исследуемых объектов и их структурных фрагментов, что существенно повышает уровень транспортной безопасности. Одновременная же оценка массы объектов исследования и их фрагментов дополняют возможности анализируемых систем. Дальнейшие перспективы развития багажных систем сканирующей цифровой радиографии с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий с регистрацией рентгеновского излучения сэндвич-детекторами заключаются в совершенствовании подходов к проектированию аппаратуры нового поколения на основе оптимального (рационального) выбора значений основных параметров сэндвич-детекторов и максимальных энергий рентгеновского излучения. Реализация отмеченных перспектив невозможна без разработки математических и имитационных моделей анализируемых систем, а также соответствующих алгоритмов.

Объект исследования: сканирующие системы цифровой рентгенографии для досмотрового контроля объектов с функцией распознавания материалов и регистрацией рентгеновского излучения сэндвич-детекторами.

Предмет исследования: алгоритмическое обеспечение процесса оценивания погрешностей при распознавании материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий в досмотровых системах сканирующей цифровой радиографии, содержащих сэндвич-детекторы излучения.

Цель работы: повышение точности распознавания материалов контролируемых объектов оптимальным выбором значений основных параметров сэндвич-детекторов излучения, используемых в досмотровых системах сканирующей цифровой радиографии.

Основные задачи исследования:

– разработать математическую модель радиационных прозрачностей объекта контроля при использовании сэндвич-детекторов для регистрации рентгеновского излучения;

– исследовать зависимость между выходными сигналами сэндвич-детектора рентгеновского излучения;

– разработать алгоритм оценки погрешностей при распознавании материалов в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения;

– разработать алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов рентгеновского излучения;

– осуществить оптимальный выбор значений основных параметров сэндвич-детекторов рентгеновского излучения, используемых в досмотровых ССЦР.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

– разработана математическая модель радиационных прозрачностей объекта контроля при использовании сэндвич-детекторов для регистрации рентгеновского излучения;

– разработан алгоритм оценки погрешностей при распознавании материалов в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения;

– разработан алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов рентгеновского излучения;

– получены значения основных параметров сэндвич-детекторов излучения (ЭАН и толщина первого детектора, толщина промежуточного фильтра из меди), которые являются оптимальными при распознавании материалов с ЭАН равным 7 для максимальной энергии в спектре рентгеновского излучения, равной 160 кэВ, что является ее типичным значением для рентгеновских систем досмотрового контроля багажа и ручной клади.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные в ней результаты могут быть использованы при проектировании досмотровых ССЦР с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий и регистрацией рентгеновского излучения сэндвич-детекторами.

Методология и методы исследования. При проведении исследований были использованы методы решения систем интегрально-параметрических

уравнений; методы теории вероятностей и математической статистики; методы математического моделирования с применением системы MathCad.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель радиационных прозрачностей объекта контроля, сформированных в сканирующей системе цифровой радиографии, содержащей сэндвич-детекторы излучения, которая учитывает немонотонность рентгеновского излучения и шумов, обусловленные его квантовой природой.

2. Оценка коэффициента корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора рентгеновского излучения для различных тестовых объектов, используемых при досмотровом контроле.

3. Алгоритм оценки погрешностей при распознавании материалов методом дуальных энергий в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения.

4. Алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов рентгеновского излучения по критерию минимума погрешности оценки эффективного атомного номера материала объекта контроля методом дуальных энергий.

5. Решение задач выбора значений параметров сэндвич-детекторов излучения, используемых в сканирующих системах цифровой радиографии, предназначенных для досмотрового контроля багажа и ручной клади, которые являются оптимальными по критерию минимума максимальной относительной погрешности оценки эффективного атомного номера вещества с $Z = 7$, обусловленной квантовой природой рентгеновского излучения.

Личный вклад автора заключается в проведении сравнительного анализа систем досмотрового контроля с сэндвич-детекторами рентгеновского излучения; в разработке математических моделей радиационных прозрачностей ОК для сэндвич-детектора рентгеновского излучения; в получении статистических оценок коэффициента корреляции между выходными сигналами сэндвич-детектора рентгеновского излучения для различных тестовых объектов контроля; в разработке алгоритма оценки погрешностей измерения эффективного атомного номера материала объекта контроля в системах рентгеновского контроля,

содержащих сэндвич-детекторы излучения; в решении задач оптимального выбора значений параметров сэндвич-детекторов излучения на основе вычислительных экспериментов.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов обеспечена корректным использованием математического аппарата, основных закономерностей взаимодействия рентгеновского излучения с веществом и открытых баз данных по ослаблению гамма-излучения с веществом. Для реализации алгоритмов моделирования в программные коды использовалось лицензионное программное обеспечение (система математических вычислений MathCad). Результаты вычислительных экспериментов с сэндвич-детекторами излучения разных видов хорошо согласуются с результатами других авторов, представленными в научно-технической литературе.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований использованы: при чтении курса лекций и проведении практических занятий для студентов по дисциплинам «Радиационные методы контроля», «Радиационный контроль и диагностика» отделения контроля и диагностики Томского политехнического университета.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на V Международном молодежном форуме «Инженерия для освоения космоса» (Томск, 2017), Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2017 – 2022), IX Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (Юрга, 2018), Международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» (Томск, 2018), Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения» (Юрга, 2018), V международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (Екатеринбург, 2019), XII Международная конференция

студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2023).

Публикации. По тематике диссертационного исследования опубликовано 9 печатных работ, в том числе 4 публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 106 наименований и приложения. Работа содержит 156 страниц, 92 таблицы и 41 рисунок.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность тематики исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы, дана общая характеристика выполненной работы.

В первой главе представлены результаты аналитического обзора современного состояния систем контроля, используемых для досмотра багажа и ручной клади пассажиров, грузовых контейнеров для обеспечения безопасности перевозок и пресечения попыток нелегального провоза запрещенных предметов, и рассмотрены перспективы их развития.

Во второй главе разработана математическая модель радиационных прозрачностей объекта контроля для сэндвич-детектора рентгеновского излучения. Выполнена аналитическая оценка коэффициента корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора. Приведены результаты расчета значений коэффициента корреляции для типичных тестовых материалов, используемых при рентгеновском досмотре багажа и ручной клади.

В третьей главе разработан алгоритм оценки погрешностей измерения эффективного атомного номера материала объекта контроля методом дуальных энергий при регистрации рентгеновского излучения сэндвич-детекторами. Полученные на его основе результаты показали, что погрешность оценки атомного номера для разных материалов имеет сильную зависимость от шумов, обусловленных квантовой природой рентгеновского излучения.

В четвертой главе разработан алгоритм оптимального выбора значений параметров сэндвич-детекторов по критерию минимума погрешности оценки эффективного атомного номера веществ методом дуальных энергий. Приведены примеры его использования для сэндвич-детектора, у которого материалом радиационно-чувствительного элемента (сцинтиллятора) для первого (переднего) детектора является йодид цезия либо оксисульфид гадолиния, либо селенид цинка. При этом максимальная энергия в спектре рентгеновского излучения была принята равной 160 кэВ, что является ее типичным значением для рентгеновских систем досмотрового контроля багажа и ручной клади.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н. Удоду Виктору Анатольевичу, профессору, кафедры информационных технологий и бизнес-аналитики Института экономики и менеджмента НИ ТГУ. А также выражает благодарность за помощь в подготовке диссертационной работы ведущему научному сотруднику, к.т.н. Осипову Сергею Павловичу, заведующему лабораторией Российско-китайской научной лаборатории радиационного контроля и досмотра к.ф.-м.н. Чахлову Сергею Владимировичу.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ДОСМОТРОВЫХ СИСТЕМ

В настоящее время незаконная перевозка товаров, наркотиков и т. д. является одним из наиболее важных составляющих глобальной проблемы безопасности для всех стран [1–4]. Системы рентгеновского сканирования являются незаменимым инструментом обеспечения безопасности в аэропортах, на железнодорожных вокзалах, таможенных пунктах и других стратегически важных объектах. Эти системы позволяют эффективно выявлять потенциально опасные предметы, скрытые в багаже, грузовых контейнерах и транспортных средствах. На сегодняшний день наиболее широко используются системы цифровой рентгенографии (ССЦР).

Принцип работы ССЦР заключается в следующем: объект контроля (ОК) просвечивается коллимированным потоком рентгеновского излучения веерообразной формы. Прошедшее через ОК излучение регистрируется коллимированным одномерным (линейным) комплексом детекторов [6, 20]. Функция распознавания материалов позволяет современным рентгеновским инспекционным системам обнаруживать опасные или запрещенные вложения в ОК, например, наркотики [5,6,21,22].

Помимо досмотрового контроля, ССЦР, применяются, в том числе, и для медицинских целей, а также для диагностики материалов и изделий с помощью рентгеновских компьютерных томографов [24–27].

Физико-математической основой распознавания материалов с применением рентгеновского излучения является метод дуальных энергий (МДЭ) [12, 28–35]. Согласно этому методу, распознавание материала осуществляется по его эффективному атомному номеру (ЭАН) либо по некоторому информационному параметру, связанному с ЭАН [28–35]. Для оценки ЭАН формируется система из двух уравнений, соответствующих двум различным максимальным (эффективным) энергиям просвечивающего излучения, которая затем решается с помощью математического программного обеспечения [7,9,28,29]. Левые части

системы уравнений применительно к досмотровым ССЦР представляют собой теоретические радиационные прозрачности ОК (толщины в длинах свободного пробега), которые выражаются в аналитической форме как функции от эффективного атомного номера и массовой толщины материала контролируемого объекта. Правые части системы уравнений – это экспериментальные радиационные прозрачности ОК (толщины в длинах свободного пробега), полученные в реальном физическом эксперименте при тех же максимальных (эффективных) энергиях [16,29,36].

Среди существующих рентгеновских систем, осуществляющих досмотровый контроль с использованием метода дуальных энергий, выделяют следующие основные типы [20,21,26,29,36].

1. Традиционная (классическая) схемная реализация МДЭ. В этом случае объект контроля подвергается просвечиванию рентгеновским излучением два раза – двумя сканирующими пучками излучения с разными максимальными энергиями, т. е. при двух разных рабочих напряжениях, устанавливаемых для генерации рентгеновских лучей на рентгеновской трубке [37]. Максимальные энергии (напряжения) выбирают так, чтобы при первом просвечивании ОК преобладающим процессом взаимодействия излучения с радиационно-чувствительными элементами детекторов был фотоэффект, а при втором просвечивании – эффект Комптона.

2. Схема с «дуальным» (двухэнергетическим) источником рентгеновского излучения. В таких системах объект контроля просвечивается один раз. Для этого используется импульсный источник рентгеновского излучения, в определенной последовательности создающий импульсы с двумя разными максимальными энергиями [38].

3. Схема с сэндвич-детекторами. Для регистрации излучения в таких системах используются сэндвич-детекторы, принципиальная схема показана на рисунке 1.1. ОК при этом просвечивается один раз. Сэндвич-детекторы имеют многослойную структуру. В большинстве случаев сэндвич-детекторы представляют собой комбинацию двух детекторов, которые отстоят друг от друга

по ходу падающего излучения и дополнительно разделены поглотителем (фильтром). Фильтр предназначен для усиления спектральных различий излучения, которое регистрируется первым по ходу распространения пучка детектором и вторым (задним) детектором [21, 39, 40].

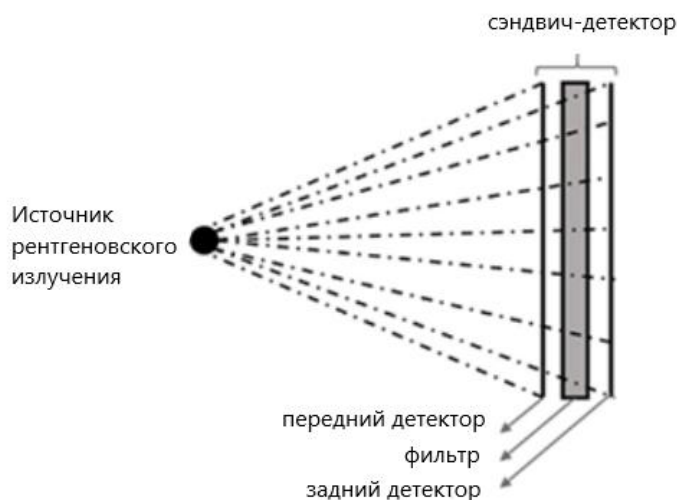


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема сэндвич-детектора [6]

Далее приведем описание современного состояния и перспективы развития ССЦР для досмотра транспортных средств, грузов, багажа и ручной клади.

1.1 Рентгеновские системы досмотра транспортных средств и грузов

В современных условиях оснащение таможенной границы инспекционно-досмотровыми комплексами для контроля различных транспортных средств и грузовых контейнеров должно стать обязательным элементом пограничных пунктов пропуска [41–43].

Для обнаружения скрытых радиоактивных материалов, расположенных внутри автомобилей или грузовых контейнеров, широко используются рентгеновские системы досмотра грузов [44, 45]. При этом системы обнаружения ядерных материалов делятся на два типа: 1) пассивные, которые служат для регистрации излучения, испускаемого грузом, и сравнения его значений с фоновым уровнем; 2) активные, основанные на обнаружении вторичного излучения в результате облучения груза, например, быстрыми нейтронами

[46,47]. Новый алгоритм поиска радиоактивных источников низкой и высокой активности среди сканируемых объектов путем постобработки записанных изображений предложен в [45]. Метод основан на математическом анализе матрицы изображения с помощью функции Гаусса. Полученные результаты показали, что этим методом может быть обнаружен источник ^{137}Cs активностью около 70 мкКи. Средняя ошибка всех оценок составила менее 4%. Этот минимальный уровень обнаружения подтвержден с использованием фактического источника с низкой активностью. Кроме того, воспроизводимость результатов была проверена и подтверждена с ошибкой менее 5%.

Производительность радиографических систем зависит от многих факторов, таких как энергия и фильтрация луча, доза облучения, размер сканируемого объекта, содержимое объекта и т. д. Одним из параметров, который может повлиять на качество распознавания материала, является расположение сканируемых объектов (разная высота от земли) (рисунок 1.2). Это связано с тем, что генерируемые линейным ускорителем рентгеновские лучи зависят от угла, и поэтому энергетические спектры меняются в зависимости от угла испускаемого излучения. Целью работы [48] было найти уравнения для кривых различения материалов в зависимости от высоты для материалов из графита, алюминия, стали и свинца. После получения смоделированных и экспериментальных кривых для диапазона высот был проведен поиск наиболее подходящих полиномиальных уравнений и получено наилучшее уравнение для каждого материала. Это может быть использовано для сокращения времени калибровки и повышения точности калибровки в системах контроля.

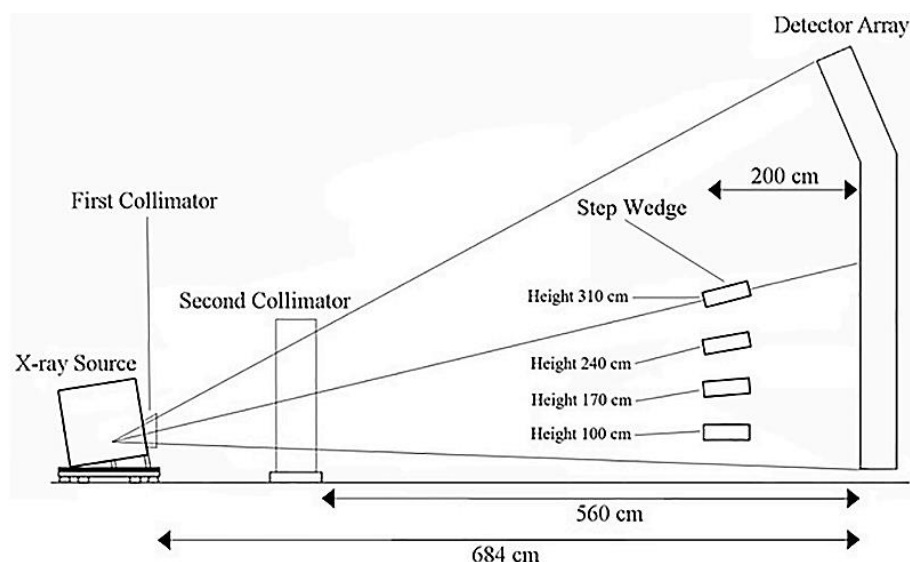


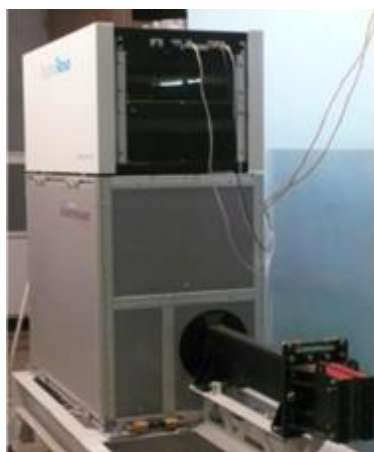
Рисунок 1.2 – Схематичная иллюстрация расположения сканируемых объектов в зависимости от высоты [48]

В работе [49] для решения задачи идентификации и различения материалов при досмотре грузов в рентгеновском досмотровом комплексе, был предложен новый метод, основанный на линейной зависимости массового коэффициента ослабления от атомного номера, что позволило реализовать возможность различения материалов независимо от их толщины. Чтобы идентифицировать неизвестный материал, его ослабление измеряется для двух рентгеновских лучей высокой и низкой энергии методом дуальных энергий. Затем тип материала определяется путем нахождения соответствующих параметров уравнения линии из библиотеки материалов.

Авторами [50] был разработан эффективный процесс калибровки для разложения материала на элементный состав в системах высокоэнергетического рентгеновского контроля на базе линейного ускорителя LINAC. Был также предложен метод многоточечной калибровки для повышения производительности разложения по всему полю обзора. Предложенный метод существенно сокращает время измерения соотношения толщин основных материалов. Кроме того, предложенный метод может автоматически учитывать эффекты физических факторов, такие как ужесточение луча и рассеяние в процессе калибровки, которые в противном случае представляли бы собой техническую проблему в обычных подходах. Еще одно ключевое преимущество предложенного метода

заключается в его способности учитывать спектральную неоднородность рентгеновских лучей в поле зрения.

В [51] описана разработка линейных ускорителей для трех типов систем досмотра грузов: стационарных, железнодорожных и мобильных (рисунок 1.3). Энергия пучка ускорителя может переключаться между значениями 3,5 МэВ и 6 МэВ. Размер пятна пучка на размещенной в вакууме мишени тормозного излучения с жидкостным охлаждением составляет менее 1,5 мм для низких энергий и менее 1 мм для высоких. Ускорители снабжены локальной радиационной защитой с узкощелевым коллиматором. Стабильность энергии от импульса к импульсу луча составляет около 0,6 % среднеквадратичного значения.



а



б



в

Рисунок 1.3 – Линейные ускорители для систем досмотра грузов: а – стационарные; б – железнодорожные; в – мобильные [51]

Авторами [52,53] разработаны техника и комплексы, которые применяются при проведении досмотровых мероприятий легкового и грузового транспорта. При проведении досмотров используются комплексы аппаратуры на основе радиометрических систем: досмотровой радиометрической системы с движущимся порталом; досмотровой радиометрической системы с неподвижным порталом; мобильной досмотровой радиометрической системы. В качестве источников высокоэнергетического рентгеновского излучения в инспекционно-досмотровых комплексах применяются бетатроны и линейные ускорители электронов.

Физические и технические принципы построения досмотрового радиометрического комплекса для интроскопии крупногабаритных грузов рассмотрены в работе [54]. Испытания были проведены на тестовых объектах, описаны основные преимущества таких комплексов перед зарубежными аналогами. Основными преимуществами является: повышение эффективности контроля исследуемых объектов за счет использования трехмерного изображения посредством стереовидения; проведение анализа подозрительных областей для нелегального провоза грузов с применением методики распознавания групп элементов с близкими атомным номером в режиме реального времени.

Возможность улучшения распознавания материалов по группам значений эффективного атомного номера при интроскопическом исследовании крупногабаритных объектов рассмотрена в работе [55]. Это достигается установкой предварительного фильтра тормозного излучения. Приведены оптимальные значения параметров фильтра и дуальной энергии ускорителя для улучшенного распознавания материалов.

С целью обнаружения оружия и средств связи в местах проведения массовых мероприятий в ходе досмотра припаркованных и движущихся транспортных средств, а также в процессе персонального дистанционного досмотра разработан мобильный досмотровый комплекс «МРК - 1» [56]. Досмотровый комплекс размещен в виде стандартного автофургона на автомобильном шасси. Герметичный кузов обеспечивает защиту от внешних атмосферных и физических воздействий. В кабине водителя расположено рабочее место оператора, имеется пульт управления, а также компьютер для просмотра получаемых рентгеновских изображений в режиме реального времени.

В статье [57] говорится о разработке системы сканирования транспортных средств «Sowa». Система оснащена рентгеновской трубкой на 300 кВ, U-образным линейным регистратором излучения, транспортной системой и полностью экранированным контейнером. Сканирующая система «Sowa» позволяет провести детальный осмотр автомобиля и выявить нелегально перевозимые предметы. Общий вид сканирующей системы представлен на

рисунке 1.4. Напряжение на рентгеновской трубке может регулироваться от 150 кВ до 300 кВ. В «Sowa» установлены матрицы линейных детекторов с размером пикселя 0,4 мм на основе сцинтиллятора GOS ($Gd_2O_2S:Tb$) толщиной 0,5 мм и присоединенных фотодиодов. Детекторы работают в режиме интегрирования сигналов с фотодиодов, время интегрирования 14 мс.

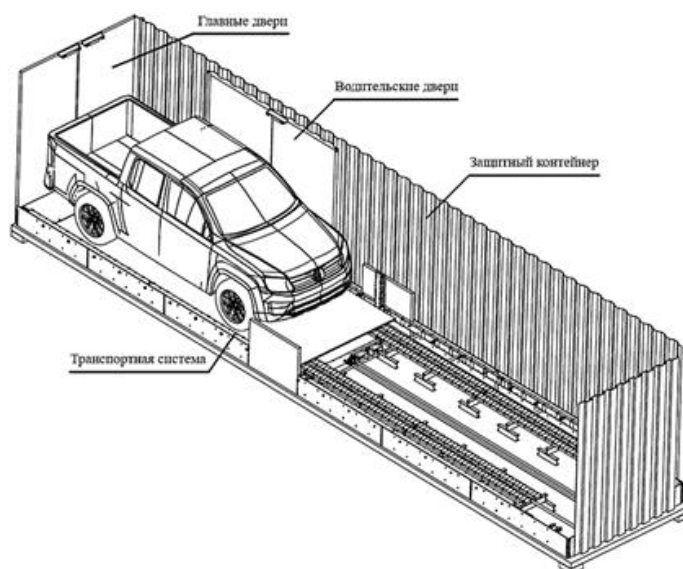


Рисунок 1.4 – Основные элементы сканирующей системы «Sowa» [57]

Для того, чтобы улучшить качество изображения снимков, получаемых с помощью метода дуальных энергий в рентгенографии, авторами [58] был разработан новый подход к распознаванию материалов с использованием модульных радиальных нейронных сетей (RBN). Суть подхода заключается в том, что каждый модуль в разработанной модульной структуре, отвечает за идентификацию одной толщины материала. Этот метод позволяет справиться со следующими проблемами, которые влияют на качество изображения: стохастический шум, флуктуация энергии источника излучения, корреляция коэффициентов ослабления при рентгеновском излучении высокой/низкой энергии.

В статье [59] сообщается, что корпорация «ADANI» разработала рентгеновский досмотровый комплекс, предназначенный для досмотра транспорта, грузов, контейнеров. В зависимости от назначения системы комплектуются порталами разного размера, соответствующими источниками рентгеновского излучения и детекторами. Системы для легковых автомобилей

могут быть оснащены генераторами рентгеновского излучения на 200 кВ или 320 кВ, а для тяжелых грузовиков и грузовых автомобилей используются бетатронные источники, дающие излучение с энергией 7,5 МэВ. Разработанное программное обеспечение осуществляет автоматическую раскрашивание изображения и сортировку материалов по трем категориям: металл, органический неметалл, неорганический неметалл. Специализированный алгоритм управляет процессом и запускает сканирование груза после того, как кабина с водителем проедет зону рентгеновского излучения. Общий вид различных систем семейства представлен на рисунке 1.5.



а



б

Рисунок 1.5 – Общий вид досмотровой системы [59]:

а – сканирование легковых автомобилей; б – сканирование грузовых автомобилей

Авторами [60] была смоделирована система рентгеновской визуализации, основанная на методе дуальных энергий, которая включает в себя такие компоненты, как источник рентгеновского излучения, коллиматор и линейку детекторов. Источником рентгеновского излучения является линейный ускоритель 4 МэВ/9 МэВ. Линейка детекторов состояла из 29 детекторов с размерами апертуры отдельного детектора $5,2 \times 5,2$ мм². Разработанная модель позволяла идентифицировать следующие материалы: графит, алюминий, сталь и свинец.

В работе [61] для контроля крупногабаритных емкостей с жидкостями и сыпучими материалами была разработана математическая модель системы контроля (рисунок 1.6), которая позволяет связывать параметры источника и детектора тормозного излучения, объекта контроля и параметры качества

контроля. Также был предложен алгоритм оценки ЭАН материала локального включения. Для моделирования тормозного излучения использовался источник с тремя уровнями максимальных энергий $E_1=5$ МэВ, $E_2=7$ МэВ и $E_3=10$ МэВ. При этом использовался сцинтиллятор на основе вольфрамата кадмия (CdWO_4). Размеры апертуры (поверхности приема излучения) отдельного детектора составляли $40 \times 40 \times 35$ мм³. Результаты моделирования показали возможность распознавания материала локальных включений из органического вещества размером более 300 мм в крупных резервуарах с сыпучим минеральным материалом.

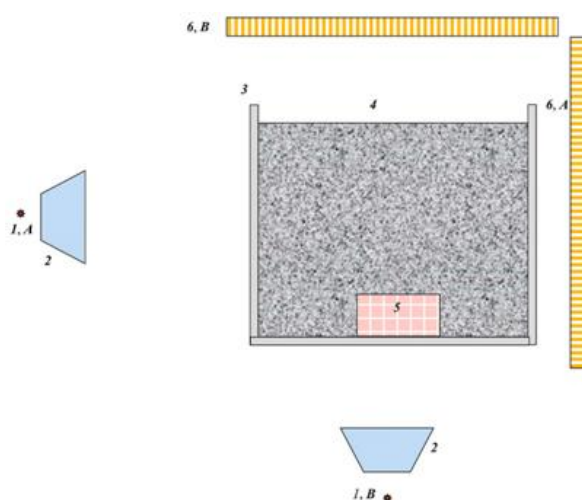


Рисунок 1.6 – Схема системы контроля: 1 – источник тормозного излучения; 2 – коллиматор целевого источника; 3 – транспортная тара; 4 – насыпной груз; 5 – локальное включение; 6 – детектор тормозного излучения [61]

В [62] проведен анализ требований, предъявляемых к системам визуализации при досмотре крупных объектов, таких как грузовые контейнеры, поезда, грузовики или лодки. Для систем визуализации наиболее важными характеристиками являются максимальное проникновение, разрешение, контрастная чувствительность и радиационная безопасность.

В процессе распознавания материалов с помощью рентгеновских сканирующих систем важной задачей является шумоподавление. Шумоподавление выполняется посредством фильтрации изображений с целью облегчения процесса распознавания материалов и повышения его точности.

В статье [63] был предложен метод шумоподавления, основанный на сверточной нейронной сети, с помощью которого удалось достичь высоких значений пикового отношения сигнала к шуму и индекса структурного сходства. Модель была проверена на реальном изображении, полученного от рентгеновской системы сканирования грузов, которая генерировала два изображения: одно при энергии 6 МэВ, другое при энергии 3 МэВ (рисунок 1.7).

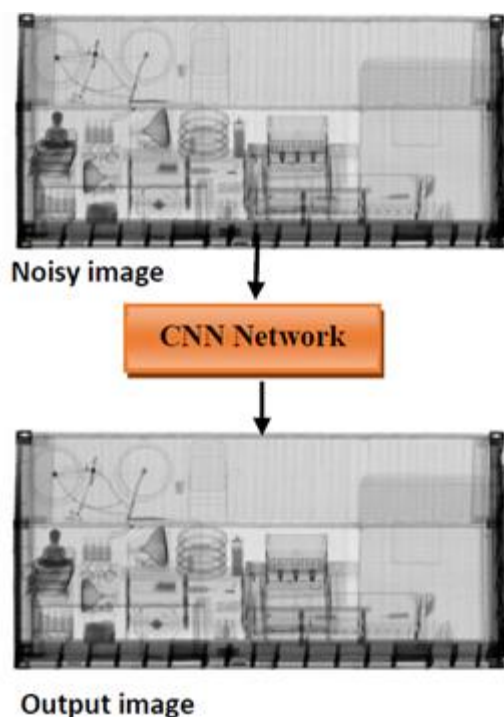


Рисунок 1.7 – Зашумленное изображение и изображение после шумоподавления [63]

В статье [64] описан алгоритм шумоподавления, основанный на кластеризации k -средних, который позволил улучшить качество изображений, получаемых при досмотре грузов. Предложенный метод шумоподавления был применен к прототипу рентгеновской системы контроля, содержащей источник рентгеновского излучения – ускоритель 4 МэВ/9 МэВ, и линейки детекторов на основе сцинтиллятора вольфрама кадмия (CdWO_4).

1.2 Системы досмотра багажа и ручной клади

Системы досмотра багажа и ручной клади осуществляют один из базовых этапов предполетной подготовки. К основному типу оборудования для проверки

безопасности багажа относятся рентгеновские досмотровые установки. Целью рентгеновского досмотра является анализ и осмотр объекта контроля неразрушающим способом с помощью рентгеновских лучей [6, 65]. Непрерывный рост пассажирских авиаперевозок требует от аэропортов принятия инженерных и организационных решений, которые сокращают время проверки безопасности при сохранении высоких нормативных стандартов безопасности. В связи с этим улучшение характеристик рентгеновских досмотровых установок и повышение эффективности их работы, в том числе на основе полностью автоматизированного подхода с использованием нейронных сетей, является важной задачей [66–70].

В статье [71] изучается метод дуальных энергий для досмотров грузов. Исследуются проблемы двухэнергетической визуализации, такие как улучшение качества изображения (т.е. снижение шума), автоматическое удаление дефектов и ошибок изображения, а также разработка алгоритмов обнаружения и идентификации изображений. Также обсуждаются выбор правильного метода формирования изображения, выбор правильного источника, выбор подходящей энергии рентгеновских лучей и соответствующих детекторов.

Метод распознавания материалов на основе МДЭ был разработан для различения и идентификации типов материалов (органических, неорганических и металлических) в багаже и ручной клади на основе значений атомного номера и плотности вещества.

Двухслойный детектор для одновременного сканирования на двух энергетических уровнях был впервые предложен Бруксом и Чиро в 1978 году [72]. Двухслойная сцинтилляционная структура, названная ими сплит-детектором, состояла из тонкого сцинтиллятора CaF_2 , за которым следовал толстый кристалл NaI , и позволяла осуществлять съем информации отдельно с каждого из элементов структуры. Разделение по энергиям возможно, потому что кристалл CaF_2 регистрирует в основном низкоэнергетические фотоны; изображения с двумя энергиями (двухэнергетические изображения) могли быть получены в результате одного сканирования. Расчеты и предварительные эксперименты показали, что сплит-детектор разделяет энергии лучше, чем метод, основанный на

использовании максимальных напряжений 100–140 кВ. С помощью сплит-детектора можно было различать два слабых раствора CaCl_2 и KI , которые имели одинаковый коэффициент абсорбции по шкале Хаунсфилда (44 ед. Н) [72].

Существенные успехи в развитии рентгеновских систем распознавания веществ и материалов связаны с применением сэндвич-детекторов. Сэндвич-детекторы состоят из двух или более детекторных слоев. Верхний слой сэндвич-детектора преимущественно регистрирует низкоэнергетические фотоны, а нижний слой регистрирует отфильтрованный, более жесткий спектр излучения [26,39,72,73]. В некоторых реализациях фильтрация включает в себя только верхний слой детектора, тогда как в некоторых случаях между слоями детектора устанавливается тонкий металлический фильтр, чаще всего медный, что увеличивает спектральное разделение, но снижает эффективность дозы [39].

Авторами [74,75] был разработан и изготовлен двухэнергетический детектор (сэндвич-детектор) для досмотра багажа и ручной клади со сцинтиллятором на основе $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ и медным фильтром состоящим из меди (Cu), толщина которого составляет 1,5 мм. Моделирование с помощью метода Монте-Карло продемонстрировало лучшую однородность и такую же способность к разделению, как у детекторов на основе сцинтилляторов йодида цезия CsI (Tl) или вольфрамата кадмия (CdWO_4). Авторы показали, что относительно недорогой люминофорный экран может быть альтернативным сцинтиллятором вместо кристаллических сцинтилляторов, таких как CsI(Tl) и CdWO_4 .

В статье [76] для решения задачи оптимизации физико-топологических параметров двухэнергетических детекторов, используемых в рентгенозащитных системах, были определены конструктивные параметры детекторов для распознавания веществ по эффективному атомному номеру (Z_{eff}) в диапазоне от 6 до 9, что особенно актуально для задач обнаружения взрывчатых веществ и наркотиков. На основе анализа и оптимизации авторами были получены конфигурации для трех типов сцинтилляторов ZnSe , CsI и GOS . Авторы отметили, что целесообразно использовать оптимальную конфигурацию со

сцинтиллятором ZnSe для устройств с максимальным напряжением на рентгеновской трубке из диапазона 80–200 кВ

В статье [59] сообщается, что корпорация «ADANI» разработала рентгеновский досмотровый комплекс, предназначенный для досмотра посылок, багажа и мелких грузов, который охватывает различные размеры тоннелей: 50×30, 60×45, 60×80, 100×100, 175×65, 175×180 см (рисунок 1.8). Технология двухэнергетического рентгеновского контроля позволяет операторам обнаруживать оружие, взрывчатые вещества (включая пластические взрывчатые вещества), наркотики, предохранители и опасные предметы, которые могут представлять угрозу безопасности. Авторы провели анализ требований, предъявляемых к сцинтилляторам в системах рентгеновского контроля. Такими сцинтилляторами являются йодид цезия CsI(Tl), Gd₂O₂S:Tb(Eu) и вольфрамат кадмия (CdWO₄).



Рисунок 1.8 – Рентгеновский досмотровый комплекс для досмотра посылок, багажа и мелких грузов [59]

В работе [6] проведен обзор подходов к классификации материалов для двухэнергетических систем и методов обнаружения органических взрывчатых веществ. Реализована процедура идентификации и классификации органических и неорганических веществ на основе оценки эффективного атомного номера (Z_{eff}) тестируемых материалов и линейных (массовых) коэффициентов ослабления индивидуальных веществ. Эксперимент был проведен на установке, содержащей сэндвич-детектор со следующими параметрами: передний детектор на основе сцинтиллятора оксисульфида гадолиния (GOS), задний детектор на основе йодида цезия (CsI), промежуточный фильтр – медь (Cu) (рисунок 1.9). Энергия источника рентгеновского излучения 160 кэВ. Были определены уравнения кривых, которые

позволяют автоматически определять эффективный атомный номер (Z_{eff}), и таким образом, идентифицировать неизвестные элементы.

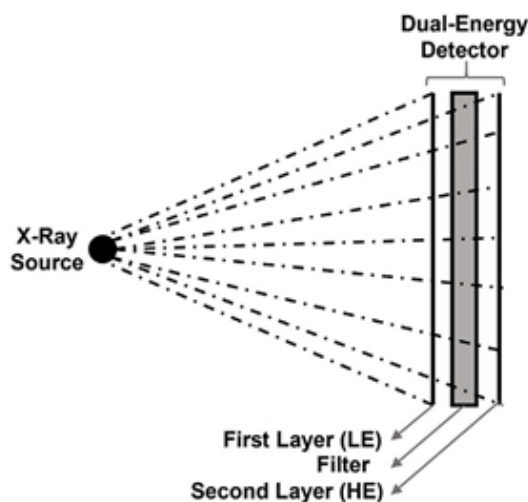


Рисунок 1.9 – Схема сэндвич-детектора, использованного для экспериментов в работе [6]

В [8] был предложен новый метод определения эффективного атомного номера (Z_{eff}) для идентификации взрывчатых веществ во время досмотра багажа. Предлагаемый метод позволяет получить отношение коэффициентов ослабления фотонов при полном и комптоновском рассеянии с использованием двухэнергетического рентгеновского пучка и четырех детекторов для фотонов, прошедших и рассеянных под тремя разными углами. Расчетные значения Z_{eff} показали хорошее совпадение с эталонными значениями для взрывчатых веществ в пределах относительной погрешности 3%.

В работе [10] представлен обзор существующих технологий, используемых в настоящее время, а также технологий, которые могут быть использованы для первичного досмотра ручной клади, багажа и авиагрузов. Основная часть обзора состоит из изучения технологий досмотра, которые могут подавать автоматический сигнал тревоги, если в багаже или грузе присутствует подозрительный предмет, такой как потенциальное взрывчатое вещество или прекурсор взрывчатого вещества.

Авторы [21] создали новый алгоритм классификации материалов для систем рентгеновского досмотра багажа и ручной клади. Алгоритм основан на МДЭ и слиянии изображений, полученных с детекторов рентгеновского излучения.

Полученные результаты показали, что предложенный алгоритм демонстрирует повышенную точность и скорость классификации материалов объектов контроля. Для повышения точности обнаружения взрывчатых веществ в присутствии материалов с низким эффективным атомным номером Z_{eff} авторы предлагают реализовать точную настройку существующих алгоритмов и обучение на основе нейронной сети.

В статье [77] рассматриваются различные проблемы, связанные с рентгеновскими технологиями в обеспечении безопасности системы пассажирских перевозок. Авторами представлен обзор различных подходов, используемых в авиационной отрасли, таких как МДЭ, планарная радиография, методы обратного рассеяния.

Одной из проблем при досмотре багажа и ручной клади является то, что распознавание запрещенных предметов может быть чрезвычайно затруднено, когда они находятся в захламленных сумках (рисунок 1.10) [78,79].

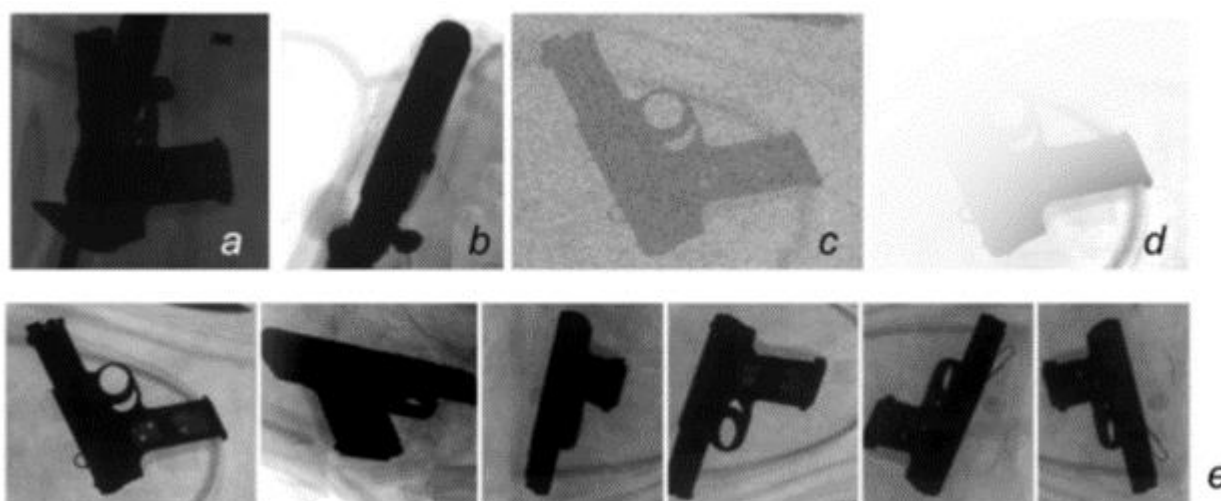


Рисунок 1.10 – Типичные проблемы при распознавании оружия в багаже: а) пистолет; б) самозарядный пистолет; в) зашумленное рентгеновское изображение; д) низкое качество изображения; е) разные углы зрения [78]

Авторами [80] были изучены подходы автоматизированного распознавания при досмотре багажа, основанные на компьютерном зрении, которые могут быть использованы для помощи людям-операторам, при досмотре багажа и ручной клади. Подходы тестировались для трех типов угроз: пистолетов, сюрикенов, бритвенных лезвий. Эксперименты показали, что наибольшая скорость

распознавания была достигнута методами, основанными на визуальных базах данных и глубоком обучении. Точность таких методов достигала 95 %.

Авторы [5] рассматривают причины возникновения и влияние пуассоновских и импульсных шумов на рентгеновских изображениях, которые создают неопределенности для оператора и систем визуализации рентгеновского контроля при различении объектов. Основное внимание уделяется методам обработки изображений, используемым в различных исследованиях для улучшения рентгеновского изображения, шумоподавления и их ограничениям.

В [81] описана оптимизация конструкции ССЦР безопасности на основе МДЭ с переменным напряжением на трубке. Сканеры безопасности, которые в настоящее время эксплуатируются Таможенной службой Кореи, используют фиксированное напряжение трубки (160 кВ); следовательно, они имеют ограничения при обнаружении тонко покрытых и/или органических контрабандных предметов с низкой плотностью. Напряжение на трубке ниже 160 кВ дает преимущество с точки зрения повышенного контраста для органических материалов, хотя это происходит за счет проникающей способности. Таким образом, сканер безопасности с переменным напряжением на трубке, регулируемым в соответствии с физическими/химическими свойствами проверяемого объекта, может повысить вероятность обнаружения контрабанды. Оптимизация конструкции сканера безопасности была выполнена с помощью моделирования методом Монте-Карло. Затем производительность разработанной системы была оценена с использованием простого фантома, чтобы продемонстрировать преимущества применения переменного напряжения на трубке.

В работе [82] представлен алгоритм обнаружения запрещенных материалов, такие как взрывчатые вещества, наркотики и оружие при досмотровом контроле. Предложенный алгоритм устраняет перекрытия на двухэнергетических рентгеновских изображениях. Результаты экспериментов показывали, что предложенный метод может быть использован для совершенствования систем автоматического анализа изображения и обнаружения запрещенных материалов.

Применение разработанного алгоритма к полуавтоматическим системам позволит облегчить работу человека-оператора.

Авторы [83] описывают проблему ухудшения эффективности досмотра багажа с помощью радиографического контроля из-за взаимодействия отображаемых объектов в случае сильной загроможденности багажа. Авторы предложили новый подход, основанный на использовании семантической сегментации изображений.

В статье [84] дается обзор современного состояния визуализации в области безопасности в аэропортах, а также прогноз будущих разработок в этой области. Обсуждаемые технологии визуализации варьируются от двухэнергетических рентгеновских систем до компьютерной томографии и терагерцовых сканеров. Автор приходит к выводу, что область визуализации в сфере безопасности аэропортов и криминалистическая/клиническая визуализация могут быть взаимосвязаны. Помимо использования одних и тех же технологий для визуализации, исследовательские интересы и инициативы сходятся в аспектах человеческого фактора, связанных с интерпретацией рентгеновских снимков и изображений компьютерной томографии.

Система Fuji – это система компьютерной радиографии (CR) с двумя люминофорными пластинами и медным фильтром толщиной 0,8 мм. Эта система на основе сэндвич-детектора была коммерчески внедрена компанией Philips в 2015 году [39]. Детектор состоит из сцинтилляционного слоя на основе иттрия-граната поверх слоя оксисульфида гадолиния. Тонкий фотодиод с фронтальной подсветкой установлен на боковой стороне сцинтиллятора и спрятан под решеткой против рассеяния, чтобы не уменьшать активную площадь детектора. Между слоями сцинтиллятора отсутствует дополнительная фильтрация, что максимизирует эффективность дозы, но спектральное разделение может быть ниже, чем для других методов.

В статье [85] описывается многослойный («сэндвич») конфигурационный детектор, состоящий из двух плоскостных детекторов рентгеновской визуализации для однократной дуальной энергетической визуализации. Для

увеличения спектрального разделения между двумя детекторами и улучшения контраста используется промежуточный медный фильтр. Качество дуальных энергетических изображений, полученных с помощью прототипа сэндвич-детекторной системы, оценивается с использованием показателя, определяемого как квадрат отношения контрастности к шуму.

Каждый плоскопанельный детектор состоит из имеющегося в продаже сцинтиллятора оксисульфида гадолиния ($Gd_2O_2S: Tb$), легированного тербием, оптически связанного с комплементарной матрицей фотодиодных матриц с оксидом полупроводника (CMOS) (RadEye1TM, Teledyne Rad-Icon Imaging Corp., Саннивейл, Калифорния). Передний и задний сцинтилляторы – Min-RTM 2000 (34 мг/см^2) и Lanex TM Fast (48 мг/см^2) соответственно. Задний сцинтиллятор толще для достижения высокой квантовой эффективности со спектром с более высокой энергией. Датчик CMOS имеет пиксели $0,048 \text{ мм}$, расположенные в формате 1024×512 , чтобы обеспечить область изображения приблизительно $50 \times 25 \text{ мм}$. Тонкий лист меди (Cu) был помещен между двумя плоскопанельными детекторами для улучшения спектрального разделения. Сэндвич-детектор был установлен в светонепроницаемую алюминиевую (Al) коробку с поликарбонатным входным окном толщиной 1 мм [85].

Один из способов уменьшения скорости счета на канал и одновременного обеспечения дополнительного энергетического разрешения для детекторов с подсчетом фотонов состоит в том, чтобы сегментировать датчик с несколькими электродами в направлении глубины так, чтобы электроды на больших глубинах детектировали более жесткие спектры. Таким образом, этот способ, объединяет технологию счета фотонов и сэндвич-детекторов. Для улучшения энергетического разрешения предложено исключить из процесса регистрации фотоны, обнаруженные в каждой второй ячейке, чтобы увеличить спектральное разделение между ячейками, которые используются для спектрального анализа. Этот подход, в некоторой степени похожий на введение фильтров в сэндвич-детекторы, увеличивает квантовый шум, но потенциально может улучшить спектральные характеристики [86].

Детектор разделения энергии для двухэнергетической радиографии может быть сконфигурирован как двухслойный сэндвич, где средняя энергия фотонов, детектируемых двумя слоями, отличается. Чтобы охарактеризовать квантовый шум такого детектора, необходимо знать ковариацию шума между двумя слоями в дополнение к дисперсии шума в каждом слое. Представлена теория, которая позволяет рассчитать ковариацию шума, и она оказывается пренебрежимо малой. Для подтверждения теории были приведены результаты эксперимента, основанные на измерениях с сэндвич-детектором NaI. Показано, что квантовые шумы в слоях независимы и пуассоновские [87].

1.3 Выводы

Из анализа литературы, приведённого выше, можно сделать ряд выводов.

1. В настоящее время для досмотрового контроля объектов наиболее широко используются сканирующие системы цифровой рентгенографии.
2. При досмотре багажа и ручной клади пассажиров чаще всего применяются сканирующие системы цифровой рентгенографии на основе сэндвич-детекторов рентгеновского излучения.
3. Для повышения эффективности досмотра современные рентгеновские досмотровые комплексы наделяются функцией распознавания материалов, реализуемой методом дуальных энергий.
4. Важной задачей является совершенствование рентгеновских досмотровых систем, в частности, за счет оптимизации их параметров и создания более высокоточных алгоритмов обработки и анализа измерительной информации.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЗРАЧНОСТЕЙ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На сегодняшний день метод дуальных энергий (МДЭ) широко используется для распознавания материалов в сканирующих системах цифровой рентгенографии, предназначенных для проведения досмотрового контроля различного вида транспорта, грузовых контейнеров, багажа [9, 37, 88–92]. С помощью метода дуальных энергий можно оценить два параметра объекта контроля (ОК) – эффективный атомный номер материала ОК и его массовую толщину [20, 37, 73]. Этого можно достичь, решая систему уравнений относительно двух, перечисленных выше, параметров, включающих теоретические и экспериментальные радиационные прозрачности объекта контроля для двух разных максимальных или эффективных энергий рентгеновского излучения [37, 73].

В настоящее время ССЦР с сэндвич-детекторами излучения широко используются, например, при досмотре багажа и ручной клади в аэропортах, на железнодорожных вокзалах и других стратегически важных объектах [5, 12, 20]. Для теоретической оценки потенциальной точности МДЭ необходимо разработать математическую модель радиационных прозрачностей ОК, которые применяются в ССЦР сэндвич-детекторов излучения, что и является целью исследований, результаты которых представлены в данной главе. Для достижения поставленной цели сначала приведем описание математической модели выходных сигналов сэндвич-детектора излучения.

2.1 Математическая модель выходных сигналов сэндвич-детектора излучения

Под выходными сигналами сэндвич-детектора излучения понимаются сигналы на выходе первого (переднего) и второго (заднего) детекторов, входящих

в состав сэндвич-детектора рентгеновского излучения. Для их математического описания предположим, что контролируемый объект облучается узким веерным пучком рентгеновского излучения, которое регистрируется линейным комплексом идентичных сэндвич-детекторов. Также допустим, что регистрация излучения происходит в аналоговом режиме. В этом случае сигналы (в виде суммарных зарядов, Кл) $B_1(H)$ и $B_2(H)$ на выходе первого и второго детекторов отдельного сэндвич-детектора из линейки при наличии ОК с учетом квантового шума будут соответственно описываться согласно [93] выражениями вида:

$$B_1(H) = \overline{B}_1(H) + N_1(H); \quad B_2(H) = \overline{B}_2(H) + N_2(H); \quad (2.1)$$

$$\overline{B}_1(H) = \gamma_c C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) \overline{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE; \quad (2.2)$$

$$\overline{B}_2(H) = \gamma_c C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H - m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \cdot \overline{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E) dE, \quad (2.3)$$

Здесь $\overline{B}_1(H), \overline{B}_2(H)$ – средние значения (математические ожидания) сигналов при наличии ОК на выходе первого и второго детекторов соответственно; H – толщина ОК (точнее – лучевой размер ОК соответствующий отдельному определенному сэндвич-детектору из линейки); γ_c – коэффициент преобразования энергии рентгеновского излучения, поглощенной детектором, в электрический заряд, Кл/МэВ;

$$C_{id} = \frac{\psi(\Omega_{det})}{F^2} ST \quad (2.4)$$

– обобщенный параметр системы контроля, характеризующий источник и детектор (сэндвич-детектор) излучения; Ω_{det} – направление центрального луча от источника на сэндвич-детектор, то есть направление луча из центра фокусного пятна источника излучения на центр апертуры (поверхности приема излучения) сэндвич-детектора; $\psi(\Omega)$ – нормированное распределение источника излучения по направлениям Ω вылета квантов; S – площадь апертуры сэндвич-детектора; T – время измерения излучения; F – расстояние от источника до сэндвич-детектора; E_0 – максимальная энергия квантов испускаемых источником, МэВ; $g(E, E_0) =$

dN/dE – энергетический спектр рентгеновского излучения, создаваемого источником, по числу квантов, $1/(MэВ \cdot с)$;

– $m(E, Z)$ – массовый коэффициент ослабления (МКО) излучения с энергией E для материала ОК, $см^2 / г$; Z – атомный номер материала ОК; ρ – плотность материала ОК, $г/(см^3)$; $\bar{E}_{ab}(E)$ – среднее значение поглощенной энергии, соответствующее одному зарегистрированному кванту с энергией E , МэВ; ρH – массовая толщина ОК, $г/(см^2)$; индекс «1» используется для обозначения переднего детектора, индекс «2» используется для обозначения второго детектора, индекс « f » используется для обозначения промежуточного фильтра; H_1, H_f, H_2 – толщина переднего детектора, промежуточного фильтра и заднего детектора, см.

$$\varepsilon_1(E) = 1 - \exp(-m(E, Z_1)\rho_1 H_1); \varepsilon_2(E) = 1 - \exp(-m(E, Z_2)\rho_2 H_2) \quad (2.5)$$

– эффективности регистрации квантов излучения с энергией E для первого и второго детекторов соответственно; $N_1(H), N_2(H)$ – шумы, обусловленные квантовой природой рентгеновского излучения, со средними значениями (математическими ожиданиями) $\bar{N}_1(H), \bar{N}_2(H)$ и дисперсиями $\sigma^2[N_1(H)], \sigma^2[N_2(H)]$ соответственно равными:

$$\bar{N}_1(H) = 0; \bar{N}_2(H) = 0; \quad (2.6)$$

$$\sigma^2[N_1(H)] = \sigma^2[B_1(H)] = \gamma_c^2 C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) \overline{E_{ab1}^2}(E) \varepsilon_1(E) dE \quad (2.7)$$

$$\sigma^2[N_2(H)] = \sigma^2[B_2(H)] = \gamma_c^2 C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H - m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \cdot \overline{E_{ab2}^2}(E) \varepsilon_2(E) dE, \quad (2.8)$$

$\overline{E_{ab1}^2}(E), \overline{E_{ab2}^2}(E)$ – средние квадраты поглощенной энергии для одного зарегистрированного кванта с энергией E для первого и второго детекторов соответственно, МэВ².

Величины $\bar{E}_{ab1}(E), \bar{E}_{ab2}(E)$ и $\overline{E_{ab1}^2}(E), \overline{E_{ab2}^2}(E)$ могут быть рассчитаны по эмпирическим формулам, представленным, например, в [94].

С помощью подстановки $H = 0$ по выражениям (2.2), (2.3) и (2.7), (2.8) можно найти средние значения (математические ожидания) и дисперсии сигналов $B_1(0)$ и $B_2(0)$ на выходе первого и второго детекторов при отсутствии ОК.

Совокупность соотношений (2.1) – (2.8) представляет собой математическую модель выходных сигналов $B_1(H)$ и $B_2(H)$ сэндвич-детектора излучения, которая является основой для построения математической модели радиационных прозрачностей ОК применительно к данному виду детекторов.

2.2 Математическая модель радиационных прозрачностей объекта контроля для сэндвич-детектора рентгеновского излучения

Радиационная (радиоскопическая) прозрачность объекта контроля представляет собой отношение сигнала на выходе детектора при наличии ОК к сигналу на выходе детектора при отсутствии объекта контроля [20,90,95]. Следовательно, выражения для радиационных прозрачностей объекта контроля d_1 , d_2 , соответствующих переднему и заднему детекторам, согласно данному определению радиационной прозрачности и математической модели (2.1) – (2.8), будут равны:

$$d_1 = \frac{B_1(H)}{B_1(0)} = \frac{\overline{B_1(H)} + N_1(H)}{\overline{B_1(0)} + N_1(0)} \quad (2.9)$$

$$d_2 = \frac{B_2(H)}{B_2(0)} = \frac{\overline{B_2(H)} + N_2(H)}{\overline{B_2(0)} + N_2(0)} \quad (2.10)$$

В качестве сигналов на выходе переднего и заднего детекторов при отсутствии объекта контроля (сигналов $B_1(0)$ и $B_2(0)$) будем использовать их выборочные средние, полученные в предварительных экспериментах по выборкам большого объема. Тогда дисперсиями этих выборочных средних можно пренебречь. Таким образом, будем считать, что

$$B_1(0) = \overline{B_1(0)}; B_2(0) = \overline{B_2(0)} \quad (2.11)$$

или

$$N_1(0) = 0; N_2(0) = 0 \quad (2.12)$$

Подставим выражения (2.11), (2.12) в (2.9) и (2.10), тогда получим

$$d_1 = \frac{B_1(H)}{B_1(0)} = \frac{\overline{B_1(H) + N_1(H)}}{\overline{B_1(0)}} = \frac{\overline{B_1(H)}}{\overline{B_1(0)}} + \frac{\overline{N_1(H)}}{\overline{B_1(0)}} = d_{t1} + \Phi_1 \quad (2.13)$$

$$d_2 = \frac{B_2(H)}{B_2(0)} = \frac{\overline{B_2(H) + N_2(H)}}{\overline{B_2(0)}} = \frac{\overline{B_2(H)}}{\overline{B_2(0)}} + \frac{\overline{N_2(H)}}{\overline{B_2(0)}} = d_{t2} + \Phi_2 \quad (2.14)$$

где d_{t1} и d_{t2} – средние значения (математические ожидания) радиационной прозрачности ОК для первого и второго детектора соответственно; Φ_1 и Φ_2 – шумы радиационных прозрачностей ОК, обусловленные квантовой природой излучения, для первого и второго детектора соответственно.

Величины d_1 и d_{t1} в (2.13) можно соответственно интерпретировать как экспериментальную и теоретическую радиационные прозрачности ОК для первого детектора, а величины d_2 и d_{t2} в (2.14) – соответственно, как экспериментальную и теоретическую радиационные прозрачности ОК для второго детектора.

Выражения для прозрачностей d_{t1} и d_{t2} , полученные из (2.2), (2.13) и (2.3), (2.14) в развернутой форме запишем в следующем виде:

$$d_{t1} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) \overline{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \overline{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE} \quad (2.15)$$

$$d_{t2} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H - m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \overline{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \overline{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E) dE} \quad (2.16)$$

Получим средние значения (математические ожидания) и дисперсии шумов Φ_1 и Φ_2 , соответственно, из выражений (2.2), (2.3), (2.6) – (2.8), (2.13), (2.14):

$$\overline{\Phi_1} = 0; \overline{\Phi_2} = 0 \quad (2.17)$$

$$\sigma^2(\Phi_1) = \frac{\sigma^2[N_1(H)]}{[\bar{B}_1(0)]^2} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z) \rho H) \overline{E_{ab1}^2}(E) \varepsilon_1(E) dE}{C_{id} \left[\int_0^{E_0} g(E, E_0) \overline{E_{ab1}}(E) \varepsilon_1(E) dE \right]^2} \quad (2.18)$$

$$\sigma^2(\Phi_2) = \frac{\sigma^2[N_2(H)]}{[\bar{B}_2(0)]^2} =$$

$$= \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z) \rho H - m(E, Z_1) \rho_1 H_1 - m(E, Z_f) \rho_f H_f) \overline{E_{ab2}^2}(E) \varepsilon_2(E) dE}{C_{id} \left[\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_1) \rho_1 H_1 - m(E, Z_f) \rho_f H_f) \overline{E_{ab2}}(E) \varepsilon_2(E) dE \right]^2}. \quad (2.19)$$

В целях наиболее полного использования падающего излучения согласно работе [96] будем считать второй детектор в сэндвич-детекторе детектором полного поглощения. В таком случае в соответствующих формулах следует принять

$$\varepsilon_2(E) = \overline{E_{ab2}}(E) / E = \overline{E_{ab2}^2}(E) / E^2 = 1 \quad (2.20)$$

Формулы (2.13) – (2.20) являются математической моделью радиационных прозрачностей объекта контроля для сэндвич-детектора излучения. Эти уравнения могут быть использованы для решения задач, связанных с исследованием метода дуальных энергий применительно к рентгеновским сканирующим системам неразрушающего контроля, включающим сэндвич-детекторы.

Отметим, что математическая модель (2.13) – (2.20) не учитывает статистическую зависимость между выходными сигналами $B_1(H)$ и $B_2(H)$ сэндвич-детектора. Тем не менее, эта зависимость может быть достаточно значительной, поскольку поток излучения, падающий на сэндвич-детектор, является общим для первого (переднего) и второго (заднего) детекторов излучения. Вследствие чего возникает необходимость разработки новой математической модели радиационных прозрачностей ОК для сэндвич-детектора излучения, которая бы учитывала статистическую зависимость его выходных сигналов.

2.3 Математическая модель радиационных прозрачностей объекта контроля для сэндвич-детектора излучения с учетом статистической зависимости его выходных сигналов

Пусть $B_0(H)$ – суммарный заряд, падающий на сэндвич-детектор за время T при наличии ОК. Величина $B_0(H)$ может быть интерпретирована как сигнал на выходе идеального детектора излучения, под которым подразумевается гипотетический детектор полного поглощения, у которого геометрические размеры и расположение идентичны первому (переднему) детектору излучения.

Величину сигнала $B_0(H)$ представим также, как и для сигналов $B_1(H)$ и $B_2(H)$, в следующем виде:

$$B_0(H) = \overline{B}_0(H) + N_0(H) \quad (2.21)$$

$$\overline{B}_0(H) = \gamma_c C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) E dE \quad (2.22)$$

– среднее значение (математическое ожидание) сигнала на выходе идеального детектора (суммарного заряда, падающего на сэндвич-детектор) при наличии ОК; $N_0(H)$ – шум (обусловлен квантовой природой излучения), среднее значение (математическое ожидание) $\overline{N}_0(H)$ которого и дисперсия $\sigma^2[N_0(H)]$ соответственно равны:

$$\overline{N}_0(H) = 0; \quad \sigma^2[N_0(H)] = \sigma^2[B_0(H)] = \gamma_c^2 C_{id}^2 \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) E^2 dE. \quad (2.23)$$

Для сигнала на выходе идеального детектора при отсутствии ОК среднее значение (математическое ожидание) и дисперсия находятся из уравнений (2.22), (2.23) с помощью подстановки $H = 0$.

Для идеального детектора излучения радиационную прозрачность ОК по аналогии с (2.13), (2.14) запишем в следующем виде:

$$d_0 = \frac{B_0(H)}{B_0(0)} = \frac{\overline{B}_0(H) + N_0(H)}{\overline{B}_0(0)} = \frac{\overline{B}_0(H)}{\overline{B}_0(0)} + \frac{N_0(H)}{\overline{B}_0(0)} = d_{r0} + \Phi_0 \quad (2.24)$$

где d_{t0} – среднее значение (математическое ожидание) радиационной прозрачности ОК; Φ_0 – шум радиационной прозрачности ОК, обусловленный квантовой природой излучения.

Величину d_0 в выражении (2.24) будем рассматривать как экспериментальную радиационную прозрачность ОК для идеального детектора, а d_{t0} – как теоретическую радиационную прозрачность.

Из выражения (2.22) можно вывести развернутое выражение для d_{t0} :

$$d_{t0} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) E dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE} \quad (2.25)$$

С учетом (2.22) – (2.24) несложно убедиться в справедливости следующих соотношений для среднего значения (математического ожидания) и дисперсии шума Φ_0 :

$$\bar{\Phi}_0 = 0; \quad \sigma^2(\Phi_0) = \frac{\sigma^2[N_0(H)]}{[\bar{B}_0(0)]^2} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) E^2 dE}{C_{id} \left[\int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE \right]^2} \quad (2.26)$$

Сигнал $B_1(H)$ на выходе первого детектора составляет некоторую случайную часть суммарного заряда, падающего на сэндвич-детектор, т. е. некоторую случайную часть сигнала $B_0(H)$ на выходе идеального детектора. Поэтому сигнал $B_1(H)$ может быть представлен в виде

$$B_1(H) = \alpha B_0(H) \quad (2.27)$$

где α – независимая от сигнала $B_0(H)$ случайная величина, распределенная на отрезке $[0, 1]$. Величина $(1 - \alpha)B_0(H)$ будет представлять собой суммарный заряд, который прошел через первый детектор за время T при наличии ОК. Исходя из этого заряд $B_f(H)$, прошедший через фильтр, может быть представлен в виде

$$B_f(H) = \beta(1 - \alpha)B_0(H) \quad (2.28)$$

где β – независимая от α и $B_0(H)$ случайная величина, распределенная на отрезке $[0, 1]$.

Будем считать, что второй детектор в сэндвич-детекторе является детектором полного поглощения, как это было предложено ранее, тогда получаем, что $B_2(H) = B_f(H)$. С учетом (2.28) выражение для сигнала $B_2(H)$ будет иметь следующий вид:

$$B_2(H) = \beta(1-\alpha)B_0(H). \quad (2.29)$$

Уравнениям для радиационных прозрачностей ОК с учетом (2.13), (2.14) и (2.24) будут иметь следующий вид:

$$d_1 = \alpha \frac{\overline{B_0(0)}}{\overline{B_1(0)}} d_0; \quad d_2 = \beta(1-\alpha) \frac{\overline{B_0(0)}}{\overline{B_2(0)}} d_0. \quad (2.30)$$

Из выражений (2.13), (2.14), (2.17), (2.24) и (2.26) следует, что средние значения (математические ожидания) и вторые начальные моменты (средние квадраты) радиационных прозрачностей d_i ($i = 0, 1, 2$) будут соответственно равны:

$$\overline{d_i} = d_{i1}; \quad \overline{d_i^2} = \sigma^2(\Phi_i) + d_{i2}^2; \quad i = 0, 1, 2. \quad (2.31)$$

Найдем средние значения (математические ожидания) $\overline{\alpha}$, $\overline{\beta}$ и вторые начальные моменты (средние квадраты) $\overline{\alpha^2}$, $\overline{\beta^2}$ случайных величин α и β , используя уравнения (2.30), (2.31):

$$\overline{\alpha} = \frac{\overline{B_1(0)}}{\overline{B_0(0)}} \cdot \frac{d_{11}}{d_{10}}; \quad \overline{\alpha^2} = \left[\frac{\overline{B_1(0)}}{\overline{B_0(0)}} \right]^2 \cdot \frac{\sigma^2(\Phi_1) + d_{11}^2}{\sigma^2(\Phi_0) + d_{10}^2}. \quad (2.32)$$

$$\overline{\beta} = \frac{\overline{B_2(0)}}{\overline{B_0(0)}} \cdot \frac{d_{22}}{(1-\overline{\alpha})d_{20}}; \quad \overline{\beta^2} = \left[\frac{\overline{B_2(0)}}{\overline{B_0(0)}} \right]^2 \cdot \frac{\sigma^2(\Phi_2) + d_{22}^2}{(1-2\overline{\alpha} + \overline{\alpha^2})(\sigma^2(\Phi_0) + d_{20}^2)}. \quad (2.33)$$

Совокупность уравнений (2.30) – (2.33) является теоретической основой, в частности, для проведения адекватного математического моделирования значений радиационных прозрачностей объектов контроля, соответствующих первому и второму детектору в структуре сэндвич-детектора с учетом статистической зависимости их выходных сигналов. Тогда законы распределения случайных величин (шумов) Φ_i ($i = 0, 1, 2$) для случая использования аналогового режима

регистрации излучения могут быть приняты согласно [93] как нормальные (гауссовские). В качестве законов распределений случайных величин α и β возьмем бета-распределения. Параметры p и q ($p, q > 0$) данного распределения определим методом моментов, т. е. из системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{p}{p+q} = M_1, \\ \frac{p(p+1)}{(p+q)(p+q+1)} = M_2, \end{cases} \quad (2.34)$$

где левая часть первого уравнения из системы (2.34) представляет собой, согласно [97], первый начальный момент бета-распределения, а левая часть второго уравнения системы (2.34) – второй начальный момент бета-распределения; M_1, M_2 – это первый и второй начальные моменты исследуемой случайной величины ($M_1 = \bar{\alpha}, M_2 = \overline{\alpha^2}$ для случайной величины α и $M_1 = \bar{\beta}, M_2 = \overline{\beta^2}$ для случайной величины β).

Для исследования разрешимости системы (2.34) относительно параметров p и q введем в рассмотрение функции $\tilde{M}_1(p, q), \tilde{M}_2(p, q)$, определяемые как левые части первого и второго уравнений системы (2.34) соответственно. Далее, вычислим якобиан J преобразования переменных (p, q) в переменные (M_1, M_2) :

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial \tilde{M}_1(p, q)}{\partial p} & \frac{\partial \tilde{M}_1(p, q)}{\partial q} \\ \frac{\partial \tilde{M}_2(p, q)}{\partial p} & \frac{\partial \tilde{M}_2(p, q)}{\partial q} \end{vmatrix} = -\frac{pq}{(p+q)^3(p+q+1)^2}.$$

На множестве $\{(p, q) \in \mathbb{R}^2 | p, q > 0\}$ якобиан отличен от нуля и является отрицательным. Следовательно, отображение множества $\{(p, q) \in \mathbb{R}^2 | p, q > 0\}$ на множество $\{(M_1, M_2) \in \mathbb{R}^2 | 0 < M_2 < M_1 < 1\}$ векторной функцией $(\tilde{M}_1(p, q), \tilde{M}_2(p, q))$ является взаимно-однозначным. Поэтому для фиксированной пары значений (M_1, M_2) из множества $\{(M_1, M_2) \in \mathbb{R}^2 | 0 < M_2 < M_1 < 1\}$ решение системы уравнений (2.34) существует и единственно. Непосредственная проверка позволит удостовериться, что это решение имеет следующий вид:

$$\begin{cases} p = M_1 \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_1^2}, \\ q = (1 - M_1) \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_1^2}. \end{cases} \quad (2.35)$$

Найдем параметры бета-распределений для случайных величин α и β с помощью (2.35).

Полученные уравнения (2.30) – (2.33 в сочетании с (2.21) – (2.29) и (2.34), (2.35) являются математической моделью радиационных прозрачностей объекта контроля для сэндвич-детектора излучения с учетом статистической зависимости его выходных сигналов.

Вопрос о предпочтительном использовании на практике одной из двух моделей: (2.13) – (2.20) или (2.30) – (2.33), необходимо решать отдельно в каждом конкретном случае, учитывая степень значимости и сложности решаемой задачи. Первая модель проще, но статистическая зависимость выходных сигналов сэндвич-детектора излучения не учитывается этой моделью. Вторая модель более сложная, но при этом она учитывает статистическая зависимость выходных сигналов сэндвич-детектора.

Для выбора одной из этих двух математических моделей может быть предложена следующая рекомендация: выполнить оценку коэффициента корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора излучения при некоторых «типичных» условиях функционирования системы контроля. Затем, по величине коэффициента корреляции можно выбрать ту или иную модель.

2.4 Исследование зависимости между выходными сигналами сэндвич-детектора рентгеновского излучения

Коэффициент корреляции выходных сигналов $B_1(H)$ и $B_2(H)$ сэндвич-детектора излучения согласно [98] есть выражение вида

$$r[B_1(H), B_2(H)] = \frac{\text{cov}[B_1(H), B_2(H)]}{\sigma[B_1(H)]\sigma[B_2(H)]} \quad (2.36)$$

$$\text{cov}[B_1(H), B_2(H)] = \overline{B_1(H) \cdot B_2(H)} - \bar{B}_1(H) \cdot \bar{B}_2(H) \quad (2.37)$$

– ковариация между сигналами $B_1(H)$ и $B_2(H)$; $\overline{B_1(H) \cdot B_2(H)}$ – среднее значение (математическое ожидание) произведения $B_1(H) \cdot B_2(H)$; $\sigma[B_1(H)], \sigma[B_2(H)]$ – средние квадратические отклонения сигналов $B_1(H)$ и $B_2(H)$ соответственно.

Из выражений (2.36) и (2.37) видно, что точное вычисление коэффициента корреляции невозможно, так как величина $\overline{B_1(H) \cdot B_2(H)}$ (среднее произведение) неизвестна, поскольку неизвестен совместный закон распределения сигналов $B_1(H)$ и $B_2(H)$. По этой причине коэффициент корреляции предлагается оценить аналитически. Для этого применим подход, который ранее был использован при построении математической модели радиационных прозрачностей ОК для сэндвич-детектора излучения с учетом статистической зависимости выходных сигналов $B_1(H)$ и $B_2(H)$. Предположим, что второй детектор в сэндвич-детекторе является детектором полного поглощения. В аналитическом виде данный подход представлен совокупностью формул (2.27) и (2.29).

Подставим выражения (2.27) и (2.29) в (2.37), учитывая независимость случайных величин α , β и сигнала $B_0(H)$, получим:

$$\begin{aligned} \text{cov}[B_1(H), B_2(H)] &= \overline{\alpha B_0(H) \beta (1-\alpha) B_0(H)} - \bar{B}_1(H) \cdot \bar{B}_2(H) = \\ &= \overline{(\alpha - \alpha^2) \beta B_0^2(H)} - \bar{B}_1(H) \cdot \bar{B}_2(H) = (\bar{\alpha} - \bar{\alpha}^2) \bar{\beta} \bar{B}_0^2(H) - \bar{B}_1(H) \cdot \bar{B}_2(H). \end{aligned} \quad (2.38)$$

Из выражений (2.27) и (2.29) с учетом независимости случайных величин α , β и сигнала $B_0(H)$ также следует:

$$\bar{B}_1(H) = \overline{\alpha B_0(H)} = \bar{\alpha} \bar{B}_0(H) \quad (2.39)$$

$$\overline{B_1^2(H)} = \overline{\alpha^2 B_0^2(H)} = \bar{\alpha}^2 \cdot \bar{B}_0^2(H) \quad (2.40)$$

$$\bar{B}_2(H) = \overline{\beta(1-\alpha) B_0(H)} = \bar{\beta}(1-\bar{\alpha}) \bar{B}_0(H) \quad (2.41)$$

Из (2.39) – (2.41) получаем:

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{B}_1(H)}{\bar{B}_0(H)}; \quad \bar{\alpha}^2 = \frac{\overline{B_1^2(H)}}{\bar{B}_0^2(H)}; \quad \bar{\beta} = \frac{\bar{B}_2(H)}{(1-\bar{\alpha}) \bar{B}_0(H)} = \frac{\bar{B}_2(H)}{\bar{B}_0(H) - \bar{B}_1(H)}. \quad (2.42)$$

Подставим (2.42) в (2.38), тогда получим

$$\begin{aligned}
\text{cov}[B_1(H), B_2(H)] &= \left[\frac{\overline{B_1(H)}}{\overline{B_0(H)}} - \frac{\overline{B_1^2(H)}}{\overline{B_0^2(H)}} \right] \frac{\overline{B_2(H)}}{\overline{B_0(H)} - \overline{B_1(H)}} \overline{B_0^2(H)} - \overline{B_1(H)} \cdot \overline{B_2(H)} = \\
&= \left[\frac{\overline{B_1(H)}}{\overline{B_0(H)}} \overline{B_0^2(H)} - \overline{B_1^2(H)} \right] \frac{\overline{B_2(H)}}{\overline{B_0(H)} - \overline{B_1(H)}} - \overline{B_1(H)} \cdot \overline{B_2(H)} = \\
&= \frac{\overline{B_2(H)}}{\overline{B_0(H)} - \overline{B_1(H)}} \left[\frac{\overline{B_1(H)}}{\overline{B_0(H)}} \overline{B_0^2(H)} - \overline{B_1^2(H)} - \overline{B_0(H)} \overline{B_1(H)} + \overline{B_1^2(H)} \right] = \\
&= \frac{\overline{B_2(H)}}{\overline{B_0(H)} - \overline{B_1(H)}} \left[\frac{\overline{B_1(H)}}{\overline{B_0(H)}} (\overline{B_0^2(H)} - \overline{B_0^2(H)}) - (\overline{B_1^2(H)} - \overline{B_1^2(H)}) \right] = \\
&= \frac{\overline{B_2(H)}}{\overline{B_0(H)} - \overline{B_1(H)}} \left\{ \frac{\overline{B_1(H)}}{\overline{B_0(H)}} \sigma^2[B_0(H)] - \sigma^2[B_1(H)] \right\}.
\end{aligned} \tag{2.43}$$

При подстановке выражения (2.43) в (2.36) окончательно получаем искомую аналитическую оценку коэффициента корреляции выходных сигналов $B_1(H)$ и $B_2(H)$ сэндвич-детектора излучения в предположении, что второй детектор в сэндвич-детекторе является детектором полного поглощения:

$$r[B_1(H), B_2(H)] = \frac{\frac{\overline{B_2(H)}}{\overline{B_0(H)} - \overline{B_1(H)}} \left\{ \frac{\overline{B_1(H)}}{\overline{B_0(H)}} \sigma^2[B_0(H)] - \sigma^2[B_1(H)] \right\}}{\sigma[B_1(H)] \sigma[B_2(H)]}. \tag{2.44}$$

Заметим, что оценка коэффициента корреляции (2.44) не меняется, если:

- все $\overline{B_i(H)}$ ($i = 0, 1, 2$) умножить на произвольную положительную константу P , в частности $P = \frac{1}{\gamma_c C_{id}}$;
- все дисперсии $\sigma^2[B_i(H)] = \sigma^2[N_i(H)]$ ($i = 0, 1, 2$) умножить на произвольную положительную константу Q , в частности $Q = \frac{1}{\gamma_c^2 C_{id}}$.

2.5 Оценка коэффициента корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора для различных тестовых объектов контроля

Рассмотрим примеры вычисления коэффициента корреляции выходных сигналов $B_1(H)$ и $B_2(H)$ сэндвич-детектора излучения на основе полученного выражения (2.44). Примем в качестве тестовых материалов такие материалы как углерод, алюминий и железо. Именно эти материалы обычно рассматриваются

как тестовые в рентгеновских системах досмотра багажа и ручной клади [93]. Предположим, основываясь на данных из работы [88], что сэндвич-детектор имеет следующую структуру: первый (передний) детектор из CsI – промежуточный фильтр из Cu – второй (задний) детектор 5 мм CsI. При вычислении коэффициента корреляции будем считать, что второй (задний) детектор 5 мм CsI является детектором полного поглощения. Энергетический спектр рентгеновского излучения по числу квантов примем равным

$$g(E, E_0) = \frac{dN}{dE} = \frac{1}{E} \varphi(E, E_0),$$

где $\varphi(E, E_0) = \frac{dI}{dE} = E_0 - E$ – энергетический спектр интенсивности I излучения источника (спектр Крамерса) при максимальной энергии в спектре E_0 , 1/с. Значение максимальной энергии E_0 зададим равным 160 кэВ. Значения массовых коэффициентов ослабления возьмем из базы данных [99].

Примеры результатов расчета промежуточных величин, входящих в уравнение (2.44), необходимых для вычисления коэффициентов корреляции, соответствующих различным тестовым объектам контроля, представлены в таблицах 2.1 – 2.3. Расчеты проводились с использованием программы MathCAD.

Таблица 2.1 – Коэффициент корреляции r для объекта контроля из углерода в зависимости от толщины фильтра: толщина первого детектора $H_1 = 0,3$ мм, энергия $E_0 = 160$ кэВ, толщина объекта контроля 0,5 см

H_f , мм	\bar{B}_0	\bar{B}_1	\bar{B}_2	$\sigma^2[B_0(H)]$	$\sigma^2[B_1(H)]$	$\sigma^2[B_2(H)]$	cov	r
0	8476,39	5089,6	3285,8	548347,81	244984,09	294903,21	81757,04	0,304
0,1	8476,39	5089,6	2934,5	548347,81	244984,09	274747,32	73018,06	0,281
0,2	8476,39	5089,62	2710,4	548347,81	244984,09	258870,64	67440,98	0,268
0,3	8476,39	5089,6	2526,0	548347,81	244984,09	244853,22	62852,91	0,257
0,4	8476,39	5089,62	2365,71	548347,81	244984,09	232157,16	58863,54	0,247
0,5	8476,39	5089,62	2223,14	548347,81	244984,09	220525,87	55316,09	0,238
0,6	8476,39	5089,62	2094,72	548347,81	244984,09	209794,41	52120,81	0,23
0,7	8476,39	5089,62	1978,04	548347,81	244984,09	199842,58	49217,47	0,222
0,8	8476,39	5089,62	1871,32	548347,81	244984,09	190576,99	46562,1	0,215
0,9	8476,39	5089,62	1773,21	548347,81	244984,09	181922,23	44120,93	0,209
1	8476,39	5089,62	1682,63	548347,81	244984,09	173815,84	41867,1	0,203

Таблица 2.2 – Коэффициент корреляции r для объекта контроля из алюминия в зависимости от толщины фильтра: толщина первого детектора $H_1 = 0,3$ мм, энергия $E_0 = 160$ кэВ, толщина объекта контроля 0,5 см

H_f , мм	\bar{B}_0	\bar{B}_1	\bar{B}_2	$\sigma^2[B_0(H)]$	$\sigma^2[B_1(H)]$	$\sigma^2[B_2(H)]$	cov	r
0	5737,42	2804,44	2852,99	449808,39	173223,73	269124,27	45369,8	0,21
0,1	5737,42	2804,44	2638,89	449808,39	173223,73	253765,55	41965,11	0,2
0,2	5737,42	2804,44	2464,19	449808,39	173223,73	240215,43	39186,93	0,192
0,3	5737,42	2804,44	2311,34	449808,39	173223,73	227902,24	36756,18	0,185
0,4	5737,42	2804,44	2174,64	449808,39	173223,73	216591,2	34582,32	0,179
0,5	5737,42	2804,44	2050,97	449808,39	173223,73	206133,65	32615,59	0,173
0,6	5737,42	2804,44	1938,21	449808,39	173223,73	196420,32	30822,42	0,167
0,7	5737,42	2804,44	1834,8	449808,39	173223,73	187365,51	29177,93	0,162
0,8	5737,42	2804,44	1739,52	449808,39	173223,73	178899,02	27662,76	0,157
0,9	5737,42	2804,44	1651,39	449808,39	173223,73	170962,19	26261,32	0,153
1	5737,42	2804,44	1569,61	449808,39	173223,73	163505,46	24960,8	0,148

Таблица 2.3 – Коэффициент корреляции r для объекта контроля из железа в зависимости от толщины фильтра: толщина первого детектора $H_1 = 0,3$ мм, энергия $E_0 = 160$ кэВ, толщина объекта контроля 0,5 см

H_f , мм	\bar{B}_0	\bar{B}_1	\bar{B}_2	$\sigma^2[B_0(H)]$	$\sigma^2[B_1(H)]$	$\sigma^2[B_2(H)]$	cov	r
0	1011,55	222,8	770,58	112073,8	22057,29	87842,86	2567,27	0,058
0,1	1011,55	222,8	740,73	112073,8	22057,29	84683,84	2467,79	0,057
0,2	1011,55	222,8	712,28	112073,8	22057,29	81659,37	2373,04	0,056
0,3	1011,55	222,8	685,26	112073,8	22057,29	78762,06	2283,01	0,055
0,4	1011,55	222,8	659,39	112073,8	22057,29	75985,05	2196,82	0,054
0,5	1011,55	222,8	634,6	112073,8	22057,29	73321,57	2114,22	0,053
0,6	1011,55	222,8	611	112073,8	22057,29	70766,62	2035,62	0,052
0,7	1011,55	222,8	588,45	112073,8	22057,29	68314,21	1960,48	0,051
0,8	1011,55	222,8	566,88	112073,8	22057,29	65959,24	1888,6	0,05
0,9	1011,55	222,8	546,23	112073,8	22057,29	63696,91	1819,82	0,049
1	1011,55	222,8	526,46	112073,8	22057,29	61522,75	1753,95	0,048

В таблицах 2.4 – 2.9 представлены результаты расчетов коэффициента корреляции для максимальных энергий 140, 150 и 160 кэВ и толщин ОК в диапазоне от 0,1 до 2 см.

Таблица 2.4 – Коэффициент корреляции r для объекта контроля из углерода в зависимости от разных значений его толщины H и разных значений максимальной энергии E_0 : толщина фильтра $H_f = 0,1$ мм, толщина первого детектора $H_1 = 0,4$ мм

$H, \text{ см}$	r		
	$E_0 = 140 \text{ кэВ}$	$E_0 = 150 \text{ кэВ}$	$E_0 = 160 \text{ кэВ}$
0,3	0,253	0,273	0,292
0,5	0,244	0,263	0,281
1	0,229	0,247	0,265
2	0,214	0,23	0,246

Таблица 2.5 – Коэффициент корреляции r для объекта контроля из алюминия в зависимости от разных значений его толщины H и разных значений максимальной энергии E_0 : толщина фильтра $H_f = 0,1$ мм, толщина первого детектора $H_1 = 0,4$ мм

$H, \text{ см}$	r		
	$E_0 = 140 \text{ кэВ}$	$E_0 = 150 \text{ кэВ}$	$E_0 = 160 \text{ кэВ}$
0,3	0,191	0,206	0,221
0,5	0,178	0,191	0,204
1	0,155	0,166	0,178
2	0,126	0,135	0,144

Таблица 2.6 – Коэффициент корреляции r для объекта контроля из железа в зависимости от разных значений его толщины H и разных значений максимальной энергии E_0 : толщина фильтра $H_f = 0,1$ мм, толщина первого детектора $H_1 = 0,4$ мм

$H, \text{ см}$	r		
	$E_0 = 140 \text{ кэВ}$	$E_0 = 150 \text{ кэВ}$	$E_0 = 160 \text{ кэВ}$
0,3	0,074	0,079	0,084
0,5	0,056	0,059	0,062
1	0,03	0,031	0,034
2	0,013	0,008	0,018

Таблица 2.7 – Коэффициент корреляции r для объекта контроля из углерода в зависимости от разных значений его толщины H и разных значений максимальной энергии E_0 : толщина фильтра $H_f = 0,7$ мм, толщина первого детектора $H_1 = 0,3$ мм

$H, \text{ см}$	r		
	$E_0 = 140 \text{ кэВ}$	$E_0 = 150 \text{ кэВ}$	$E_0 = 160 \text{ кэВ}$
0,1	0,21	0,23	0,249

0,3	0,195	0,214	0,232
0,5	0,186	0,205	0,222
1	0,175	0,192	0,209
2	0,163	0,179	0,194

Таблица 2.8 – Коэффициент корреляции r для объекта контроля из алюминия в зависимости от разных значений его толщины H и разных значений максимальной энергии E_0 : толщина фильтра $H_f = 0,7$ мм, толщина первого детектора $H_1 = 0,3$ мм

H , см	r		
	$E_0 = 140$ кэВ	$E_0 = 150$ кэВ	$E_0 = 160$ кэВ
0,1	0,165	0,182	0,198
0,3	0,146	0,16	0,174
0,5	0,137	0,15	0,162
1	0,122	0,132	0,142
2	0,101	0,109	0,117

Таблица 2.9 – Коэффициент корреляции r для объекта контроля из железа в зависимости от разных значений его толщины H и разных значений максимальной энергии E_0 : толщина фильтра $H_f = 0,7$ мм, толщина первого детектора $H_1 = 0,3$ мм

H , см	r		
	$E_0 = 140$ кэВ	$E_0 = 150$ кэВ	$E_0 = 160$ кэВ
0,1	0,099	0,107	0,114
0,3	0,059	0,063	0,068
0,5	0,045	0,047	0,051
1	0,024	0,026	0,027
2	0,01	0,013	0,015

Для наглядности, на рисунке 2.1 представлены графические зависимости коэффициента корреляции от толщин тестовых ОК, соответствующие трем различным значениям максимальной энергии в спектре излучения. В дополнение к этому приведем следующие значения коэффициента корреляции (2.44), вычисленные при $E_0 = 160$ кэВ; $H_1 = 0,3$ мм; $H_f = 0,7$ мм.

$$r_C(1) = 0,25; r_C(5) = 0,22; r_{Al}(1) = 0,2; r_{Al}(5) = 0,16; r_{Fe}(1) = 0,11; r_{Fe}(5) = 0,05. \quad (2.45)$$

Здесь нижний индекс у коэффициента корреляции r означает материал ОК, а число в скобках – толщину ОК в мм.

Из рисунка 2.1 и выражения (2.45) видно, коэффициент корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора излучения монотонно уменьшается как с ростом атомного номера материала ОК, так и его увеличением его толщины. Это обусловлено ужесточением пучка излучения, в результате чего он становится статистически более однородным. В то же время сами значения коэффициента корреляции оказываются сравнительно небольшими, на основании чего может быть сделана рекомендация по использованию при исследовании МДЭ более простой модели (2.13) – (2.20).

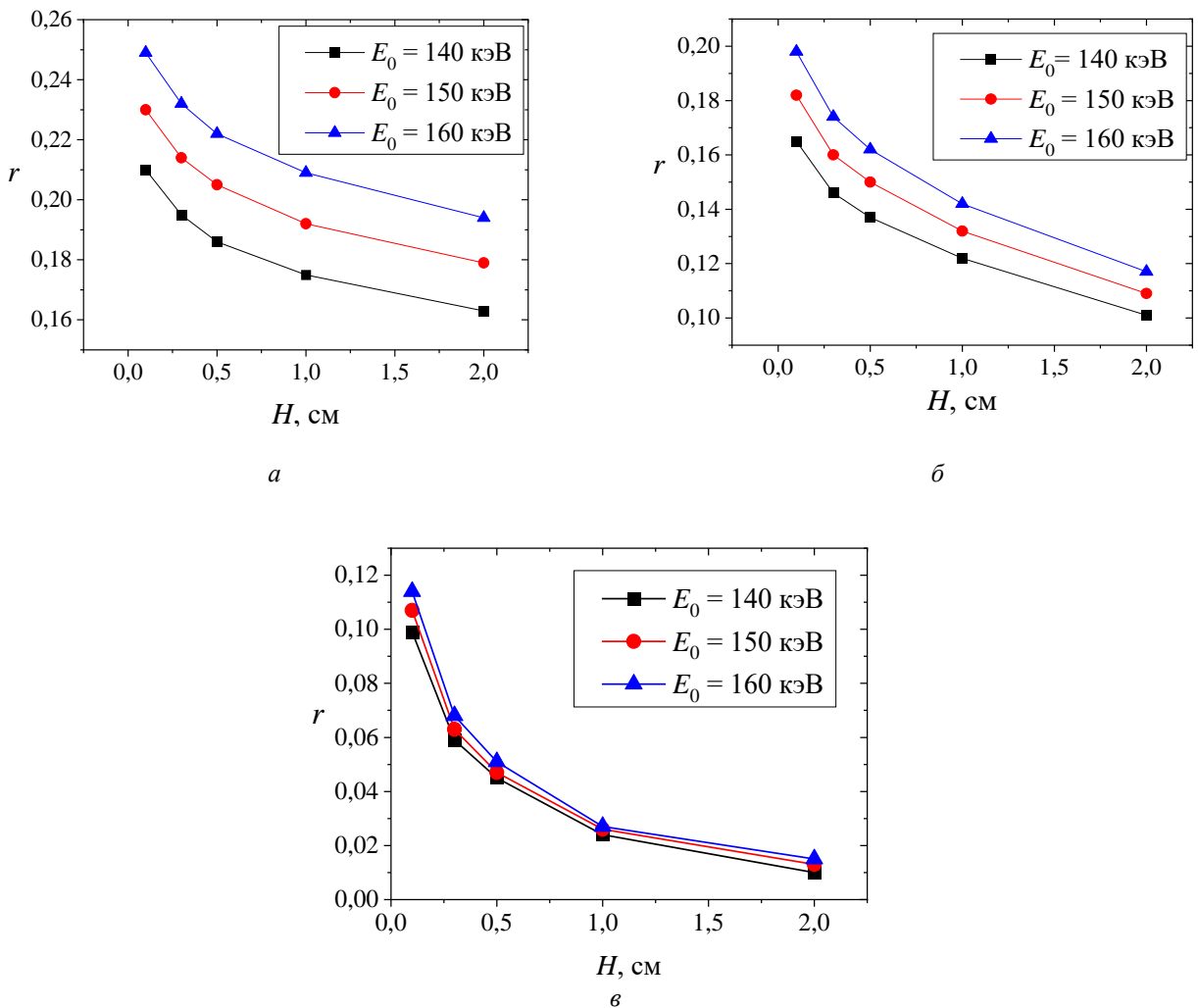


Рисунок 2.1 – Коэффициент корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора излучения с параметрами $H_f = 0,7$ мм:
a – углерод, *б* – алюминий, *в* – железо

2.6 Выводы по главе 2

1. Разработаны две математические модели радиационных прозрачностей объекта контроля для сэндвич-детектора рентгеновского излучения. При этом первая модель не учитывает, а вторая – учитывает статистическую зависимость выходных сигналов сэндвич-детектора.
2. Получена аналитическая оценка коэффициента корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора и приведены результаты вычислений его значений для типичных тестовых материалов, используемых при рентгеновском досмотре багажа и ручной клади. Из этих результатов следует, что для широко диапазона тестовых объектов и разных значений максимальной энергии в спектре рентгеновского излучения коэффициент корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора излучения имеет достаточно низкое значение (не превышает 0,3). Поэтому для проведения дальнейших исследований метода дуальных энергий применительно к досмотровым системам, содержащим сэндвич-детекторы, будет вполне достаточно использовать модель (2.13) – (2.20).

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ, СОДЕРЖАЩЕЙ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Угроза совершения террористических актов послужила основанием к решению проблемы по созданию комплекса условий для обеспечения транспортной безопасности в сфере авиа и железнодорожных перевозок.

Точность (эффективность) МДЭ зависит от большого количества факторов, в том числе от шумов выходных сигналов детекторов, которые вызваны квантовой природой рентгеновского излучения, так называемых квантовых шумов [5, 36, 88, 93].

В [93] был разработан алгоритм для статистической оценки погрешности МДЭ, обусловленной квантовыми шумами, применительно к классической схеме реализации МДЭ. В данном разделе предлагается алгоритм применительно к схеме реализации МДЭ на основе использования сэндвич-детекторов рентгеновского излучения.

3.1 Описание алгоритма

Представим алгоритм в виде последовательности следующих шагов.

Шаг 1. Задается максимальная энергия E_0 квантов, испускаемых источником рентгеновского излучения – рентгеновским аппаратом, применяемым для просвечивания ОК. Это равносильно заданию максимального напряжения на рентгеновской трубке.

Шаг 2. Задается числовой (т. е. по числу квантов) энергетический спектр $g(E, E_0)$ излучения, генерируемого рентгеновским аппаратом.

Шаг 3. Задаются материалы и параметры отдельных компонент сэндвич-детектора, имеющего структуру вида: передний детектор (первый по направлению падающего излучения детектор) – промежуточный фильтр – задний детектор (второй по направлению падающего излучения детектор).

Шаг 4. Задаются минимальное Z_{\min} и максимальное Z_{\max} значения атомного

номера (эффективного атомного номера) Z материала ОК, подлежащего распознаванию.

Шаг 5. Задаются минимальное d_{\min} и максимальное d_{\max} значения радиационной прозрачности ОК.

Шаг 6. Задается множество допустимых решений, т.е. множество контролируемых объектов, исследование которых с помощью МДЭ может быть обеспечено физико-техническими возможностями системы контроля:

$$D(Z, \rho H) = \{(Z, \rho H) | Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}; d_{\min} \leq d_{t1}(Z, \rho H) < d_{t2}(Z, \rho H) \leq d_{\max}\}. \quad (3.1)$$

Здесь ρ – плотность материала ОК, г/см³; H – толщина ОК, см; ρH – массовая толщина ОК, г/см²; $d_{t1}(Z, \rho H)$, $d_{t2}(Z, \rho H)$ – теоретические значения радиационной прозрачности ОК, соответствующие первому (т. е. переднему) и второму (т. е. заднему) детекторам, которые вычисляются по формулам [83]:

$$d_{t1}(Z, \rho H) = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) \bar{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \bar{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE}; \quad (3.2)$$

$$d_{t2}(Z, \rho H) = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H - m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \bar{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \bar{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E) dE}, \quad (3.3)$$

где $m(E, Z)$ – массовый коэффициент ослабления (МКО) излучения для материала ОК, см² /г; $\bar{E}_{ab}(E)$ – среднее значение поглощенной детектором энергии, соответствующее одному зарегистрированному кванту с энергией E , МэВ; $\varepsilon(E)$ – эффективность регистрации излучения детектором; нижний индекс «1» в формулах (3.2) и (3.3) означает, что соответствующий параметр относится к первому детектору (аналогично этому индекс «2» означает соответствие второму детектору, а индекс «f» – промежуточному фильтру).

Из уравнения (3.1) следует, что для определенного значения параметра Z минимальное $(\rho H)_{\min}(Z)$ и максимальное $(\rho H)_{\max}(Z)$ значения параметра ρH находятся из уравнений:

$$d_{t1}(Z, (\rho H)_{\max}(Z)) = d_{\min}, \quad d_{t2}(Z, (\rho H)_{\min}(Z)) = d_{\max}. \quad (3.4)$$

Шаг 7. Задается множество тестовых ОК:

$$D_t(Z_t, (\rho H)_t) = \left\{ (Z_t, (\rho H)_t) \in D(Z, \rho H) \mid Z_t \in M_t(Z); d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t) = d_{s2}; d_{s2} \in P(d_{t2}) \right\}.$$

Индекс «*t*» в данном выражении означает «тестовый»; $M_t(Z)$ – задаваемое множество тестовых материалов; $P(d_{t2})$ – задаваемое множество значений теоретической радиационной прозрачности d_{t2} для второго детектора (заметим, что в данном контексте прозрачность d_{t2} выступает как самостоятельный физический параметр); d_{s2} – определенное значение (уровень) прозрачности d_{t2} , которое в силу (1) должно удовлетворять неравенству $d_{\min} < d_{s2} \leq d_{\max}$.

Из описания множества $D_t(Z_t, (\rho H)_t)$ следует, что массовая толщина $(\rho H)_t$ тестового ОК, материал которого имеет атомным номер Z_t , выбирается из условия

$$d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t) = d_{s2}.$$

Такой выбор массовых толщин тестовых ОК объясняется тем, что объекты с теми или иными близкими свойствами распознать сложнее. В данном случае в роли такового свойства выступает равенство теоретических радиационных прозрачностей объектов для второго детектора.

Шаг 8. Для каждого тестового ОК, т. е. для каждой пары $(Z_t, (\rho H)_t)$ вычисляется прозрачность $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t)$, соответствующая первому (переднему) детектору.

Шаг 9. Из множества $D_t(Z_t, (\rho H)_t)$ тестовых ОК выбирается один элемент и условно называется «базовым» (основным), а соответствующие ему параметры обозначаются через Z_{tb} и $(\rho H)_{tb}$.

Шаг 10. Выбирается значение $\sigma_b(\Phi_2)$ среднеквадратического отклонения (СКО) шума Φ_2 , который соответствует прозрачности $d_{t2}(Z_{tb}, (\rho H)_{tb})$. Назовем его базовым СКО.

Шаг 11. Рассчитывается, используя соответствующие формулы из [100], значение СКО $\sigma(\Phi_2)$ шума Φ_2 , который соответствует прозрачности $d_{r_2}(Z_r, (\rho H)_r)$:

$$\begin{aligned} \sigma(\Phi_2) &= \frac{\sigma(\Phi_2)}{\sigma_b(\Phi_2)} \sigma_b(\Phi_2) = \\ &= \frac{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_r)(\rho H)_r - m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \overline{E_{ab2}^2}(E) \varepsilon_2(E) dE}}{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_{rb})(\rho H)_{rb} - m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \overline{E_{ab2}^2}(E) \varepsilon_2(E) dE}} \cdot \sigma_b(\Phi_2) \end{aligned}$$

Здесь $\overline{E_{ab2}^2}(E)$ – средний квадрат поглощенной вторым детектором энергии для одного зарегистрированного кванта с энергией E , МэВ².

Шаг 12. Рассчитывается, используя соответствующие формулы из [100], значение СКО $\sigma(\Phi_1)$ шума Φ_1 , соответствующего прозрачности $d_{r_1}(Z_r, (\rho H)_r)$:

$$\begin{aligned} \sigma(\Phi_1) &= \frac{\sigma(\Phi_1)}{\sigma_b(\Phi_2)} \sigma_b(\Phi_2) = \\ &= \frac{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_r)(\rho H)_r) \overline{E_{ab1}^2}(E) \varepsilon_1(E) dE}}{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_{rb})(\rho H)_{rb} - m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \overline{E_{ab2}^2}(E) \varepsilon_2(E) dE}} \cdot \\ &\quad \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f) \overline{E_{ab2}^2}(E) \varepsilon_2(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \overline{E_{ab1}^2}(E) \varepsilon_1(E) dE} \cdot \sigma_b(\Phi_2). \end{aligned}$$

Здесь $\overline{E_{ab1}^2}(E)$ – средний квадрат поглощенной первым детектором энергии для одного зарегистрированного кванта с энергией E , МэВ².

Шаг 13. Разыгрываются значения шумов Φ_1 и Φ_2 . Для этого полагаем, как это было сделано в [93]:

$$\Phi_1 \in N(0, \sigma(\Phi_1)); \Phi_2 \in N(0, \sigma(\Phi_2)).$$

Кроме того, предполагаем, что Φ_1 и Φ_2 являются независимыми случайными величинами. Такое допущение следует из результатов корреляционного анализа выходных сигналов сэндвич-детектора [100]. В дополнение, отметим, что СКО $\sigma(\Phi_1)$

и СКО $\sigma(\Phi_2)$ могут быть соответственно интерпретированы как уровни квантового шума для первого и второго детекторов.

Шаг 14. Рассчитываются фактические (реальные) радиационные прозрачности для каждого тестового ОК:

$$d_1(Z_t, (\rho H)_t) = d_{11}(Z_t, (\rho H)_t) + \Phi_1;$$

$$d_2(Z_t, (\rho H)_t) = d_{12}(Z_t, (\rho H)_t) + \Phi_2.$$

Шаг 15. Получаем для каждого тестового ОК оценки его параметров Z_t и $(\rho H)_t$ как решение относительно $(Z, \rho H) \in D(Z, \rho H)$ системы уравнений:

$$\begin{cases} d_{11}(Z, \rho H) = d_1(Z_t, (\rho H)_t), \\ d_{12}(Z, \rho H) = d_2(Z_t, (\rho H)_t). \end{cases}$$

Шаг 16. Действия, описанные на шагах 13–15, воспроизводятся n раз подряд, т. е. осуществляется n однотипных моделирований. В итоге формируется и сохраняется в памяти набор данных $(Z_i, (\rho H)_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$), где Z_i и $(\rho H)_i$ – оценки параметров Z_t и $(\rho H)_t$, тестового ОК полученные в результате i -го моделирования ($i=1, 2, \dots, n$).

Шаг 17. Для каждого тестового ОК рассчитываются среднее значение Z_m , среднеквадратическая m_z и относительная среднеквадратическая δ_z погрешности оценки Z_t :

$$Z_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i, \quad m_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_t)^2}, \quad \delta_z = \frac{m_z}{Z_t} \cdot 100\% .$$

Вышеописанный алгоритм имеет следующее принципиальное отличие от его прообраза – алгоритма из [93]: наличие шагов (этапов) 1–3. Кроме того, между этими алгоритмами имеется существенная разница и для шагов 6, 8, 11, 12, 15, обусловленная тем, что теоретические радиационные прозрачности ОК в данном случае и в [93] вычисляются по значительно отличающимся формулам. Это различие вполне закономерно, так как классическая схемная реализация МДЭ сильно отличается от реализации МДЭ по схеме с применением сэндвич-детекторов.

3.2 Пример использования алгоритма

Шаг 1. Зададим типичное для ряда досмотровых систем [93] значение максимальной энергии $E_0=160$ кэВ.

Шаг 2. Зададим числовой энергетический спектр излучения по аналогии с [93] следующим образом:

$$g(E, E_0) = C \frac{E_0 - E}{E} \exp(-m(E, Z_g)(\rho H)_g)$$

Здесь C – постоянный множитель (согласно формулам, представленным на шагах 6, 11 и 12, можно считать, что $C=1$); $m(E, Z_g)$ – МКО излучения для поглотителя в виде выходного окна рентгеновской трубки толщиной 1,5 мм, изготовленного из силикатного стекла (SiO_2 [101]) с массовой толщиной $(\rho H)_g$.

Шаг 3. Рассмотрим сэндвич-детектор со следующей структурой: первый детектор из иодида цезия (CsI) толщиной 0,3 мм – промежуточный фильтр в форме пластины из меди (Cu) толщиной 0,7 мм – второй детектор из иодида цезия (CsI) толщиной 5 мм. Такая структура детектора была изучена в работе [88].

В ходе предварительных расчетов было установлено, что эффективность регистрации квантов излучения в диапазоне энергий от 0 до 125 кэВ для второго детектора – 5 мм CsI составляет не менее 95 %, а в диапазоне энергий от 130 до 160 кэВ это значение плавно уменьшается до 81 %. Результаты расчетов эффективности представлены в таблице 3.1 и на рисунке 3.1. Для моделирования предположим, что второй (задний) детектор характеризуется полным поглощением падающего излучения (детектор полного поглощения):

$$\varepsilon_2(E) = \bar{E}_{ab2}(E)/E = \overline{E_{ab2}^2}(E)/E^2 = 1$$

Такое предположение вполне естественно, так как в этом случае происходит максимальное использование прошедшего через ОК излучения. По аналогии с [72] представим, что преобладающим процессом взаимодействия излучения с первым (передним) детектором является фотоэффект, а значит

$$\bar{E}_{ab1}(E)/E = 1.$$

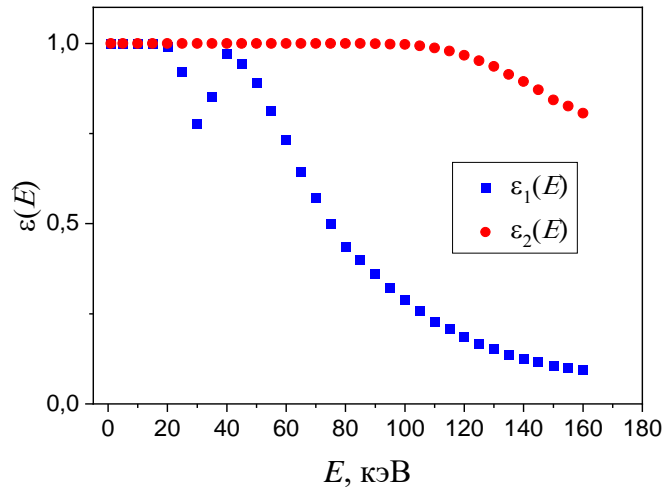


Рисунок 3.1 – Эффективности регистрации квантов излучения в зависимости от их энергии для первого ε_1 и второго ε_2 детекторов

Таким образом, для проведения моделирования относительно сэндвич-детектора будем полагать, что он представляет собой композицию вида: первый детектор 0,3 мм CsI (с преобладающим процессом взаимодействия с излучением в виде фотоэффекта); промежуточный фильтр 0,7 мм Cu; второй детектор есть детектор полного поглощения.

Шаг 4. Зададим значения Z_{\min} и Z_{\max} по аналогии с [93]:

$$Z_{\min}=3 \text{ (Li)}, Z_{\max}=30 \text{ (Zn)}.$$

Шаг 5. Зададим значения d_{\min} и d_{\max} по аналогии с [93]:

$$d_{\min} = 1/2^{16} \approx 1,526 \cdot 10^{-5}; d_{\max} = d_{t_2}(Z_{Fe}, (\rho H_{\min})_{Fe}) = d_{t_2}(26; 0,063) = 0,96894.$$

Здесь 2^{16} – число уровней квантования аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с разрядностью $m=16$, которые используются в структуре измерительных каналов системы контроля (заметим, что применение АЦП с разрядностью $m=16$ является достаточно типичным для многих досмотровых систем); $Z_{Fe} = 26$ – атомный номер железа; $(\rho H_{\min})_{Fe} = 0,063 \text{ г/см}^2$ – массовая толщина ОК За объект контроля возьмем стальную проволоку диаметром $(H_{\min})_{Fe}=0,08$ мм. Известно, что такая проволока характеризует разрешение досмотрового интроскопа конвейерного типа ТС-СКАН 6040 [102].

Таблица 3.1 – Эффективности регистрации квантов излучения в зависимости от их энергии для первого ε_1 и второго ε_2 детекторов

$E, \text{кэВ}$	$\varepsilon_1(E)$	$\varepsilon_2(E)$
1	1	1
5	1	1
10	1	1
15	1	1
20	0.989	1
25	0.922	1
30	0.776	1
35	0.852	1
40	0.971	1
45	0.942	1
50	0.89	1
55	0.813	1
60	0.733	1
65	0.644	1
70	0.57	1
75	0.5	1
80	0.435	1
85	0.399	1
90	0.36	0.999
95	0.322	0.998
100	0.29	0.997
105	0.257	0.993
110	0.228	0.987
115	0.207	0.979
120	0.185	0.967
125	0.167	0.952
130	0.152	0.936
135	0.137	0.914
140	0.126	0.894
145	0.116	0.871
150	0.105	0.843
155	0.099	0.826
160	0.094	0.806

Шаг 6. Формируем в соответствии с (3.1) множество допустимых решений

$$D(Z, \rho H) = \{(Z, \rho H) | 3 \leq Z \leq 30; 1,526 \cdot 10^{-5} \leq d_{r1}(Z, \rho H) < d_{r2}(Z, \rho H) \leq 0,96894\}. \quad (3.5)$$

Для проведения численного моделирования использовали дискретизацию множества (3.5). Для параметра Z , изменяющегося в диапазоне от 3 до 30, был выбран шаг дискретизации равный 0,1. Для параметра ρH , изменяющегося в диапазоне от $(\rho H)_{\min}(Z)$, до $(\rho H)_{\max}(Z)$, шаг дискретизации составил 0,1 г/см². При

этом $(\rho H)_{\min}(Z)$ и $(\rho H)_{\max}(Z)$ находились, в соответствии с (3.4), а также с заданными на шаге 5 минимальным и максимальным значениями радиационной прозрачности ОК, из следующих уравнений:

$$d_{t_2}(Z, (\rho H)_{\min}(Z)) = 0,96894; d_{t_1}(Z, (\rho H)_{\max}(Z)) = 1,526 \cdot 10^{-5}.$$

Для полноты описания множества допустимых решений (3.5) в таблицах 3.2 и 3.3 приведены, рассчитанные в системе MathCad, значения $(\rho H)_{\min}(Z)$ и $(\rho H)_{\max}(Z)$, соответствующие целочисленным значениям Z (таблица 3.2) и некоторым нецелочисленным значениям Z (таблица 3.3). Наряду с этим на рисунке 3.2 приведены графики функций $(\rho H)_{\min}(Z)$ и $(\rho H)_{\max}(Z)$.

Таблица 3.2 – Минимальное $(\rho H)_{\min}(Z)$ и максимальное $(\rho H)_{\max}(Z)$ значения массовой толщины объекта контроля, соответствующие целочисленным значениям атомного номера Z

Z	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$(\rho H)_{\max}(Z), \text{г/см}^2$	76,782	73,966	69,891	63,599	62,237	60,697	62,301	57,911	58,069
$(\rho H)_{\min}(Z), \text{г/см}^2$	0,242	0,235	0,223	0,205	0,202	0,198	0,203	0,188	0,187

Z	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$(\rho H)_{\max}(Z), \text{г/см}^2$	54,463	53,836	50,135	49,697	46,257	46,078	46,847	41,557	38,475
$(\rho H)_{\min}(Z), \text{г/см}^2$	0,174	0,169	0,154	0,149	0,135	0,131	0,129	0,11	0,099

Z	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$(\rho H)_{\max}(Z), \text{г/см}^2$	39,121	37,815	36,432	33,775	32,374	29,905	28,691	25,934	25,554	23,975
$(\rho H)_{\min}(Z), \text{г/см}^2$	0,097	0,091	0,084	0,076	0,07	0,063	0,059	0,052	0,05	0,046

Таблица 3.3 – Минимальное $(\rho H)_{\min}(Z)$ и максимальное $(\rho H)_{\max}(Z)$ значения массовой толщины объекта контроля, соответствующие некоторым нецелым значениям атомного номера Z

Z	3,5	4,6	5,3	11,7	14,2	18,4	19,5	24,3	26,6
$(\rho H)_{\max}(Z), \text{г/см}^2$	75,325	71,445	67,85	55,489	50,021	44,574	39,898	33,333	29,157
$(\rho H)_{\min}(Z), \text{г/см}^2$	0,238	0,228	0,218	0,178	0,153	0,121	0,104	0,074	0,06

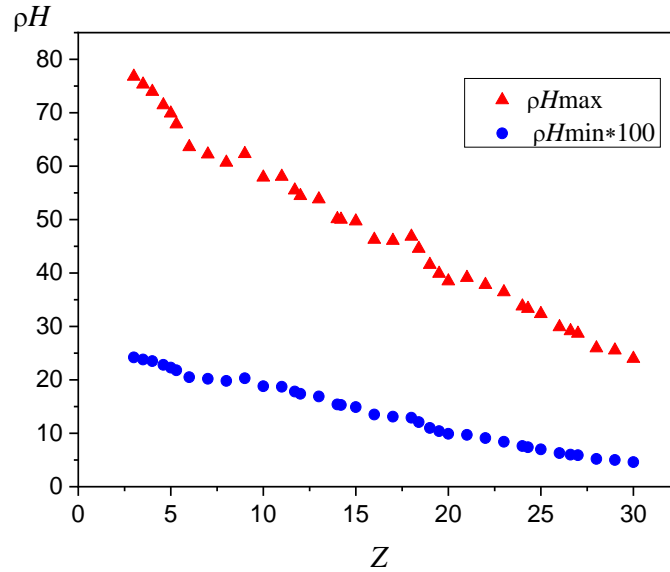


Рисунок 3.2 – Зависимости минимального ρH_{\min} и максимального ρH_{\max} значений массовой толщины ОК от эффективного атомного номера Z

Далее, проверим взаимную однозначность отображения пар $(Z, \rho H)$ в пары (d_{i1}, d_{i2}) , т. е. проверим взаимную однозначность отображения R множества допустимых решений $D(Z, \rho H)$ во множество теоретических прозрачностей

$$Q(d_{i1}, d_{i2}) = \{(d_{i1}, d_{i2}) \mid 1,526 \cdot 10^{-5} \leq d_{i1} < d_{i2} \leq 0,96894\}.$$

Такую проверку необходимо выполнить для того, чтобы в последующем быть уверенным, что к погрешности в оценке атомного номера приводят именно квантовые шумы, а не систематические погрешности, вызванные неоднозначностью данного отображения.

Для этого необходимо вычислить и исследовать якобиан J преобразования переменных $(Z, \rho H)$ в переменные (d_{i1}, d_{i2}) :

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial d_{i1}(Z, \rho H)}{\partial Z} & \frac{\partial d_{i1}(Z, \rho H)}{\partial(\rho H)} \\ \frac{\partial d_{i2}(Z, \rho H)}{\partial Z} & \frac{\partial d_{i2}(Z, \rho H)}{\partial(\rho H)} \end{vmatrix}.$$

Однако вычисление данного якобиана является затруднительным из-за сложности аналитических зависимостей (3.2), (3.3), описывающих величины $d_{i1}(Z, \rho H)$ и $d_{i2}(Z, \rho H)$ как функции от переменных Z и ρH . Кроме того, следует учесть тот факт, что МКО излучения задаются не аналитически, а в дискретной форме, в

виде таблиц.. В связи с этим, оценим взаимную однозначность отображения R с помощью линий уровня.

Формирование линий уровня можно осуществлять в равной степени на основе функций $d_{i1}(Z, \rho H)$ или $d_{i2}(Z, \rho H)$. Для определенности будем использовать функцию $d_{i1}(Z, \rho H)$, т.е. теоретическую прозрачность ОК для первого детектора.

Аналитическая зависимость линии уровня функции $d_{i1}(Z, \rho H)$ имеет вид:

$$L(d_{10}) = \{(Z, \rho H) \in D(Z, \rho H) \mid d_{i1}(Z, \rho H) = d_{10}\},$$

где d_{10} – некоторый уровень теоретической прозрачности ОК для первого детектора.

Далее будем задавать разные значения параметра d_{10} и получать разные линии уровня функции $d_{i1}(Z, \rho H)$. После чего для всех элементов линии уровня $L(d_{10})$ вычислим значения функции $d_{i2}(Z, \rho H)$ – теоретической прозрачности ОК для второго детектора. Эти значения символически обозначим так: $d_{i2}(Z|L(d_{10}))$.

В таблицах 3.4 – 3.12 приведены линии уровня $L(d_{10})$ для разных значений d_{10} и соответствующие им значения прозрачности $d_{i2}(Z|L(d_{10}))$.

Таблица 3.4 – Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10}=0,00002$ и $d_{10}=0,00005$ и соответствующие ей значения $d_{i2}(Z|L(d_{10}))$

Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,00002$		Значения $d_{i2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,00002$		Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,00005$		Значения $d_{i2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,00005$	
Z	ρH	Z	$d_{i2}(Z L(d_{10}))$	Z	ρH	Z	$d_{i2}(Z L(d_{10}))$
3	74,83	3	6,717E-005	3	68,245	3	1,55E-04
4	72,064	4	7,291E-005	4	65,651	4	1,68E-04
5	68,07	5	7,935E-005	5	61,935	5	1,84E-04
6	61,915	6	8,815E-005	6	56,243	6	2,05E-04
7	60,558	7	9,825E-005	7	54,906	7	2,29E-04
8	59,029	8	1,094E-004	8	53,415	8	2,55E-04
9	60,555	9	1,215E-004	9	54,682	9	2,84E-04
10	56,257	10	1,332E-004	10	50,696	10	3,12E-04
11	56,381	11	1,447E-004	11	50,708	11	3,40E-04
12	52,849	12	1,568E-004	12	47,432	12	3,69E-04
13	52,208	13	1,698E-004	13	46,747	13	4,00E-04
14	48,589	14	1,816E-004	14	43,41	14	4,28E-04
15	48,138	15	1,921E-004	15	42,913	15	4,54E-04
16	44,778	16	2,034E-004	16	39,826	16	4,82E-04

17	44,577	17	2,134E-004	17	39,557	17	5,06E-04
18	45,297	18	2,221E-004	18	40,112	18	5,28E-04
19	40,16	19	2,306E-004	19	35,489	19	5,49E-04
20	37,16	20	2,392E-004	20	32,768	20	5,70E-04
21	37,766	21	2,456E-004	21	33,242	21	5,87E-04
22	36,487	22	2,523E-004	22	32,055	22	6,03E-04
23	35,137	23	2,583E-004	23	30,816	23	6,18E-04
24	32,56	24	2,637E-004	24	28,507	24	6,32E-04
25	31,196	25	2,688E-004	25	27,269	25	6,45E-04
26	28,805	26	2,737E-004	26	25,14	26	6,57E-04
27	27,624	27	2,779E-004	27	24,074	27	6,67E-04
28	24,965	28	2,813E-004	28	21,73	28	6,76E-04
29	24,592	29	2,846E-004	29	21,38	29	6,84E-04
30	23,062	30	2,877E-004	30	20,026	30	6,92E-04

Таблица 3.5 – Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10}=0,0002$ и $d_{10}=0,0005$ и соответствующие ей значения $d_{r2}(Z|L(d_{10}))$

Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,0002$		Значения $d_{r2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,0002$		Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} =$ 0,0005		Значения $d_{r2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,0005$	
Z	ρH	Z	$d_{r2}(Z L(d_{10}))$	Z	ρH	Z	$d_{r2}(Z L(d_{10}))$
3	58,363	3	5,43E-04	3	51,886	3	1,24E-03
4	56,038	4	5,92E-04	4	49,746	4	1,35E-03
5	52,748	5	6,47E-04	5	46,743	5	1,48E-03
6	47,761	6	7,23E-04	6	42,228	6	1,65E-03
7	46,466	7	8,12E-04	7	40,97	7	1,86E-03
8	45,042	8	9,09E-04	8	39,598	8	2,09E-03
9	45,933	9	1,02E-03	9	40,254	9	2,33E-03
10	42,421	10	1,12E-03	10	37,058	10	2,58E-03
11	42,276	11	1,22E-03	11	36,819	11	2,82E-03
12	39,393	12	1,33E-03	12	34,2	12	3,06E-03
13	38,661	13	1,44E-03	13	33,451	13	3,33E-03
14	35,755	14	1,55E-03	14	30,835	14	3,57E-03
15	35,203	15	1,65E-03	15	30,257	15	3,80E-03
16	32,533	16	1,75E-03	16	27,868	16	4,04E-03
17	32,176	17	1,84E-03	17	27,467	17	4,26E-03
18	32,499	18	1,93E-03	18	27,65	18	4,46E-03
19	28,638	19	2,01E-03	19	24,285	19	4,66E-03
20	26,337	20	2,09E-03	20	22,259	20	4,85E-03
21	26,623	21	2,15E-03	21	22,432	21	5,01E-03
22	25,576	22	2,22E-03	22	21,482	22	5,17E-03
23	24,507	23	2,28E-03	23	20,526	23	5,31E-03
24	22,596	24	2,33E-03	24	18,871	24	5,45E-03
25	21,549	25	2,38E-03	25	17,95	25	5,57E-03
26	19,807	26	2,43E-03	26	16,458	26	5,68E-03
27	18,915	27	2,47E-03	27	15,679	27	5,78E-03
28	17,035	28	2,50E-03	28	14,093	28	5,86E-03
29	16,721	29	2,54E-03	29	13,806	29	5,94E-03
30	15,626	30	2,57E-03	30	12,877	30	6,02E-03

Таблица 3.6 – Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10}=0,001$ и $d_{10}=0,002$ и соответствующие ей значения $d_{t_2}(Z|L(d_{10}))$

Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,001$		Значения $d_{t_2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,001$		Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,002$		Значения $d_{t_2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,002$	
Z	ρH	Z	$d_{t_2}(Z L(d_{10}))$	Z	ρH	Z	$d_{t_2}(Z L(d_{10}))$
3	47,016	3	2,31E-03	3	42,172	3	4,30E-03
4	45,021	4	2,52E-03	4	40,326	4	4,67E-03
5	42,239	5	2,75E-03	5	37,769	5	5,10E-03
6	38,082	6	3,08E-03	6	33,978	6	5,70E-03
7	36,862	7	3,46E-03	7	32,8	7	6,41E-03
8	35,534	8	3,89E-03	8	31,523	8	7,20E-03
9	36,021	9	4,35E-03	9	31,85	9	8,06E-03
10	33,065	10	4,82E-03	10	29,136	10	8,93E-03
11	32,761	11	5,26E-03	11	28,774	11	9,77E-03
12	30,346	12	5,72E-03	12	26,564	12	1,06E-02
13	29,592	13	6,22E-03	13	25,815	13	1,15E-02
14	27,199	14	6,67E-03	14	23,647	14	1,24E-02
15	26,609	15	7,11E-03	15	23,053	15	1,32E-02
16	24,435	16	7,55E-03	16	21,097	16	1,40E-02
17	24,01	17	7,97E-03	17	20,656	17	1,48E-02
18	24,099	18	8,36E-03	18	20,663	18	1,55E-02
19	21,102	19	8,73E-03	19	18,03	19	1,62E-02
20	19,285	20	9,09E-03	20	16,422	20	1,68E-02
21	19,381	21	9,40E-03	21	16,449	21	1,74E-02
22	18,507	22	9,71E-03	22	15,657	22	1,80E-02
23	17,639	23	9,97E-03	23	14,876	23	1,85E-02
24	16,174	24	1,02E-02	24	13,6	24	1,90E-02
25	15,348	25	1,05E-02	25	12,869	25	1,94E-02
26	14,04	26	1,07E-02	26	11,741	26	1,98E-02
27	13,346	27	1,09E-02	27	11,132	27	2,02E-02
28	11,975	28	1,10E-02	28	9,966	28	2,05E-02
29	11,708	29	1,12E-02	29	9,723	29	2,08E-02
30	10,902	30	1,13E-02	30	9,034	30	2,11E-02

Таблица 3.7 – Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10}=0,005$ и $d_{10}=0,01$ и соответствующие ей значения $d_{i2}(Z|L(d_{10}))$

Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,005$		Значения $d_{i2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,005$		Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,01$		Значения $d_{i2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,01$	
Z	ρH	Z	$d_{i2}(Z L(d_{10}))$	Z	ρH	Z	$d_{i2}(Z L(d_{10}))$
3	35,809	3	9,72E-03	3	31,026	3	1,80E-02
4	34,17	4	1,05E-02	4	29,553	4	1,94E-02
5	31,916	5	1,15E-02	5	27,537	5	2,11E-02
6	28,615	6	1,28E-02	6	24,611	6	2,34E-02
7	27,509	7	1,43E-02	7	23,573	7	2,62E-02
8	26,312	8	1,61E-02	8	22,449	8	2,93E-02
9	26,445	9	1,80E-02	9	22,453	9	3,27E-02
10	24,057	10	2,00E-02	10	20,317	10	3,62E-02
11	23,629	11	2,18E-02	11	19,852	11	3,96E-02
12	21,696	12	2,37E-02	12	18,131	12	4,30E-02
13	20,966	13	2,57E-02	13	17,428	13	4,65E-02
14	19,1	14	2,76E-02	14	15,794	14	4,98E-02
15	18,515	15	2,94E-02	15	15,228	15	5,31E-02
16	16,852	16	3,11E-02	16	13,789	16	5,61E-02
17	16,407	17	3,28E-02	17	13,356	17	5,91E-02
18	16,324	18	3,44E-02	18	13,222	18	6,18E-02
19	14,165	19	3,59E-02	19	11,414	19	6,45E-02
20	12,835	20	3,73E-02	20	10,293	20	6,69E-02
21	12,788	21	3,86E-02	21	10,206	21	6,92E-02
22	12,11	22	3,99E-02	22	9,621	22	7,13E-02
23	11,451	23	4,10E-02	23	9,059	23	7,32E-02
24	10,418	24	4,21E-02	24	8,206	24	7,50E-02
25	9,815	25	4,30E-02	25	7,701	25	7,67E-02
26	8,917	26	4,39E-02	26	6,97	26	7,82E-02
27	8,42	27	4,47E-02	27	6,558	27	7,95E-02
28	7,512	28	4,54E-02	28	5,832	28	8,07E-02
29	7,302	29	4,60E-02	29	5,652	29	8,18E-02
30	6,762	30	4,66E-02	30	5,2186	30	8,29E-02

Таблица 3.8 – Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10}=0,05$ и $d_{10}=0,1$ и соответствующие ей значения $d_{r2}(Z|L(d_{10}))$

Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,05$		Значения $d_{r2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,05$		Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,1$		Значения $d_{r2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,1$	
Z	ρH	Z	$d_{r2}(Z L(d_{10}))$	Z	ρH	Z	$d_{r2}(Z L(d_{10}))$
3	20,03	3	7,43E-02	3	15,342	3	1,36E-01
4	18,976	4	7,90E-02	4	14,492	4	1,44E-01
5	17,544	5	8,50E-02	5	13,333	5	1,53E-01
6	15,525	6	9,29E-02	6	11,722	6	1,66E-01
7	14,695	7	1,02E-01	7	11,012	7	1,81E-01
8	13,801	8	1,13E-01	8	10,251	8	1,97E-01
9	13,588	9	1,24E-01	9	9,994	9	2,15E-01
10	12,08	10	1,37E-01	10	8,785	10	2,34E-01
11	11,59	11	1,48E-01	11	8,33	11	2,52E-01
12	10,388	12	1,60E-01	12	7,373	12	2,70E-01
13	9,799	13	1,72E-01	13	6,867	13	2,88E-01
14	8,716	14	1,83E-01	14	6,029	14	3,04E-01
15	8,246	15	1,94E-01	15	5,631	15	3,20E-01
16	7,335	16	2,03E-01	16	4,948	16	3,35E-01
17	6,982	17	2,13E-01	17	4,655	17	3,48E-01
18	6,796	18	2,21E-01	18	4,48	18	3,60E-01
19	5,767	19	2,29E-01	19	3,76	19	3,72E-01
20	5,123	20	2,36E-01	20	3,308	20	3,81E-01
21	5,003	21	2,43E-01	21	3,2	21	3,90E-01
22	4,65	22	2,49E-01	22	2,949	22	3,98E-01
23	4,32	23	2,54E-01	23	2,719	23	4,05E-01
24	3,864	24	2,59E-01	24	2,414	24	4,12E-01
25	3,585	25	2,64E-01	25	2,225	25	4,17E-01
26	3,209	26	2,67E-01	26	1,98	26	4,23E-01
27	2,989	27	2,71E-01	27	1,834	27	4,27E-01
28	2,634	28	2,74E-01	28	1,609	28	4,31E-01
29	2,531	29	2,77E-01	29	1,54	29	4,34E-01
30	2,3179	30	2,80E-01	30	1,404	30	4,37E-01

Таблица 3.9 – Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10}=0,2$ и $d_{10}=0,3$ и соответствующие ей значения $d_{r2}(Z|L(d_{10}))$

Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,2$		Значения $d_{r2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,2$		Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,3$		Значения $d_{r2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,3$	
Z	ρH	Z	$d_{r2}(Z L(d_{10}))$	Z	ρH	Z	$d_{r2}(Z L(d_{10}))$
3	10,685	3	2,49E-01	3	7,976	3	3,54E-01
4	10,057	4	2,60E-01	4	7,489	4	3,66E-01
5	9,194	5	2,74E-01	5	6,814	5	3,83E-01
6	8,01	6	2,93E-01	6	5,893	6	4,05E-01
7	7,443	7	3,14E-01	7	5,425	7	4,29E-01
8	6,843	8	3,37E-01	8	4,936	8	4,56E-01
9	6,581	9	3,62E-01	9	4,693	9	4,84E-01
10	5,698	10	3,88E-01	10	4,015	10	5,12E-01
11	5,318	11	4,13E-01	11	3,7	11	5,39E-01
12	4,629	12	4,37E-01	12	3,181	12	5,65E-01
13	4,239	13	4,60E-01	13	2,876	13	5,89E-01
14	3,658	14	4,82E-01	14	2,45	14	6,11E-01
15	3,358	15	5,02E-01	15	2,222	15	6,31E-01
16	2,902	16	5,20E-01	16	1,899	16	6,49E-01
17	2,688	17	5,36E-01	17	1,74	17	6,64E-01
18	2,549	18	5,51E-01	18	1,633	18	6,78E-01
19	2,109	19	5,64E-01	19	1,339	19	6,91E-01
20	1,833	20	5,75E-01	20	1,154	20	7,01E-01
21	1,752	21	5,85E-01	21	1,094	21	7,11E-01
22	1,597	22	5,94E-01	22	0,991	22	7,19E-01
23	1,459	23	6,02E-01	23	0,9	23	7,25E-01
24	1,284	24	6,09E-01	24	0,788	24	7,31E-01
25	1,175	25	6,15E-01	25	0,718	25	7,36E-01
26	1,038	26	6,20E-01	26	0,632	26	7,41E-01
27	0,956	27	6,24E-01	27	0,58	27	7,44E-01
28	0,835	28	6,28E-01	28	0,505	28	7,48E-01
29	0,795	29	6,31E-01	29	0,48	29	7,50E-01
30	0,722	30	6,35E-01	30	0,435	30	7,53E-01

Таблица 3.10 – Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10}=0,4$ и $d_{10}=0,5$ и соответствующие ей значения $d_{r2}(Z|L(d_{10}))$

Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,4$		Значения $d_{r2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,4$		Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,5$		Значения $d_{r2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,5$	
Z	ρH	Z	$d_{r2}(Z L(d_{10}))$	Z	ρH	Z	$d_{r2}(Z L(d_{10}))$
3	6,061	3	4,54E-01	3	4,579	3	5,51E-01
4	5,68	4	4,67E-01	4	4,284	4	5,63E-01
5	5,147	5	4,84E-01	5	3,868	5	5,80E-01
6	4,422	6	5,07E-01	6	3,303	6	6,02E-01
7	4,036	7	5,33E-01	7	2,988	7	6,27E-01
8	3,635	8	5,61E-01	8	2,664	8	6,54E-01
9	3,419	9	5,89E-01	9	2,478	9	6,81E-01
10	2,891	10	6,17E-01	10	2,071	10	7,07E-01
11	2,635	11	6,43E-01	11	1,866	11	7,31E-01
12	2,239	12	6,68E-01	12	1,568	12	7,53E-01
13	2,002	13	6,91E-01	13	1,388	13	7,73E-01
14	1,688	14	7,11E-01	14	1,159	14	7,91E-01
15	1,516	15	7,29E-01	15	1,031	15	8,06E-01
16	1,283	16	7,45E-01	16	0,866	16	8,19E-01
17	1,166	17	7,59E-01	17	0,782	17	8,30E-01
18	1,086	18	7,71E-01	18	0,724	18	8,40E-01
19	0,884	19	7,81E-01	19	0,586	19	8,48E-01
20	0,758	20	7,90E-01	20	0,5	20	8,55E-01
21	0,715	21	7,97E-01	21	0,47	21	8,61E-01
22	0,644	22	8,04E-01	22	0,422	22	8,66E-01
23	0,583	23	8,09E-01	23	0,381	23	8,70E-01
24	0,509	24	8,14E-01	24	0,332	24	8,73E-01
25	0,462	25	8,18E-01	25	0,3	25	8,76E-01
26	0,406	26	8,22E-01	26	0,264	26	8,79E-01
27	0,372	27	8,24E-01	27	0,241	27	8,81E-01
28	0,323	28	8,27E-01	28	0,209	28	8,83E-01
29	0,307	29	8,29E-01	29	0,199	29	8,84E-01
30	0,278	30	8,31E-01	30	0,18	30	8,85E-01

Таблица 3.11 – Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10}=0,6$ и $d_{10}=0,7$ и соответствующие ей значения $d_{i2}(Z|L(d_{10}))$

Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,6$		Значения $d_{i2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,6$		Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,7$		Значения $d_{i2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,7$	
Z	ρH	Z	$d_{i2}(Z L(d_{10}))$	Z	ρH	Z	$d_{i2}(Z L(d_{10}))$
3	3,371	3	6,45E-01	3	2,352	3	7,36E-01
4	3,15	4	6,55E-01	4	2,194	4	7,45E-01
5	2,834	5	6,70E-01	5	1,968	5	7,58E-01
6	2,405	6	6,91E-01	6	1,661	6	7,75E-01
7	2,158	7	7,14E-01	7	1,476	7	7,94E-01
8	1,903	8	7,38E-01	8	1,287	8	8,14E-01
9	1,749	9	7,62E-01	9	1,168	9	8,34E-01
10	1,444	10	7,85E-01	10	0,952	10	8,53E-01
11	1,286	11	8,06E-01	11	0,837	11	8,69E-01
12	1,068	12	8,24E-01	12	0,687	12	8,83E-01
13	0,935	13	8,40E-01	13	0,595	13	8,95E-01
14	0,773	14	8,54E-01	14	0,487	14	9,06E-01
15	0,683	15	8,66E-01	15	0,426	15	9,14E-01
16	0,569	16	8,77E-01	16	0,353	16	9,21E-01
17	0,51	17	8,85E-01	17	0,314	17	9,27E-01
18	0,47	18	8,92E-01	18	0,288	18	9,32E-01
19	0,379	19	8,98E-01	19	0,231	19	9,36E-01
20	0,322	20	9,03E-01	20	0,196	20	9,40E-01
21	0,301	21	9,08E-01	21	0,183	21	9,43E-01
22	0,27	22	9,11E-01	22	0,163	22	9,45E-01
23	0,243	23	9,14E-01	23	0,147	23	9,47E-01
24	0,211	24	9,17E-01	24	0,128	24	9,48E-01
25	0,191	25	9,19E-01	25	0,115	25	9,50E-01
26	0,168	26	9,20E-01	26	0,101	26	9,51E-01
27	0,153	27	9,22E-01	27	0,092	27	9,52E-01
28	0,133	28	9,23E-01	28	0,08	28	9,53E-01
29	0,126	29	9,24E-01	29	0,076	29	9,53E-01
30	0,114	30	9,25E-01	30	0,069	30	9,54E-01

Таблица 3.12 – Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10}=0,75$ и соответствующие ей значения $d_{t_2}(Z|L(d_{10}))$.

Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,75$		Значения $d_{t_2}(Z L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,75$	
Z	ρH	Z	$d_{t_2}(Z L(d_{10}))$
3	1,896	3	7,81E-01
4	1,768	4	7,89E-01
5	1,584	5	8,00E-01
6	1,332	6	8,15E-01
7	1,179	7	8,32E-01
8	1,022	8	8,50E-01
9	0,921	9	8,67E-01
10	0,746	10	8,83E-01
11	0,651	11	8,96E-01
12	0,53	12	9,08E-01
13	0,457	13	9,18E-01
14	0,372	14	9,27E-01
15	0,324	15	9,34E-01
16	0,267	16	9,40E-01
17	0,298	17	9,44E-01
18	0,217	18	9,48E-01
19	0,174	19	9,52E-01
20	0,147	20	9,54E-01
21	0,137	21	9,56E-01
22	0,123	22	9,58E-01
23	0,11	23	9,60E-01
24	0,096	24	9,61E-01
25	0,086	25	9,62E-01
26	0,076	26	9,63E-01
27	0,069	27	9,64E-01
28	0,06	28	9,64E-01
29	0,057	29	9,65E-01
30	0,052	30	9,65E-01

На рисунках 3.3–3.5 приведены графики функции $d_{t_2}(Z|L(d_{10}))$ (от переменной Z) для различных линий уровня $L(d_{10})$. Уровень d_{10} изменялся дискретно от значения 0,00002, близкого к минимальному значению прозрачности ($d_{\min} = 1/2^{16} \approx 1,526 \cdot 10^{-5}$), до значения 0,75, близкого к значению прозрачности $d_{t_1}(26;0,063) = 0,779$ для первого детектора для объекта контроля из железа с массовой толщиной $(\rho H_{\min})_{\text{Fe}} = 0,063 \text{ г/см}^2$).

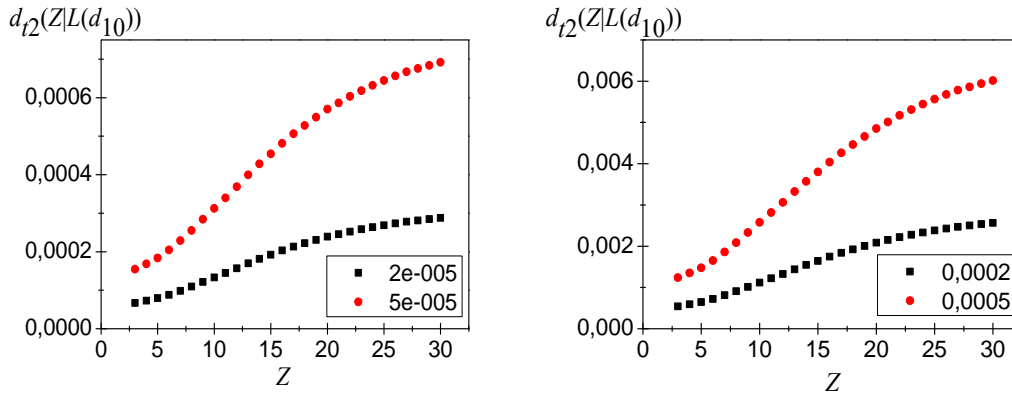


Рисунок 3.3 – Графики функции $d_{t_2}(Z|L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,00002; 0,00005; 0,0002; 0,0005$

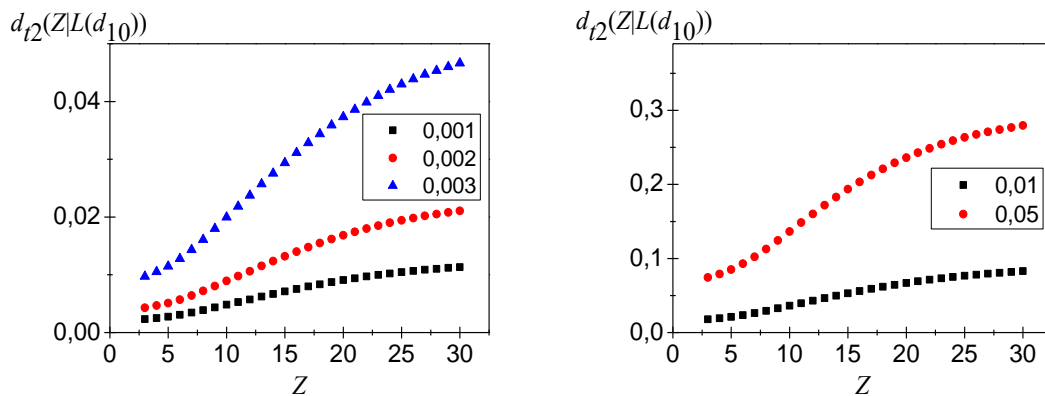


Рисунок 3.4 – Графики функции $d_{t_2}(Z|L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,05$

Из рисунков 3.3 – 3.5 видно, что зависимости носят монотонный характер. Это свидетельствует о взаимной однозначности отображения R множества допустимых решений $D(Z, \rho H)$ во множество теоретических прозрачностей $Q(d_{t_1}, d_{t_2})$.

Шаги 7, 8. Зададим следующее множество тестовых материалов $M_t(Z) = \{6;13;26\}$, т. е. в качестве таковых, по аналогии с [93], выберем углерод (C), алюминий (Al) и железо (Fe). Массовые толщины $(\rho H)_t$ и прозрачности $d_{t_1}(Z_t, (\rho H)_t)$ для первого детектора, соответствующие этим материалам, представлены в таблице 3.13 и на рисунке 3.6.

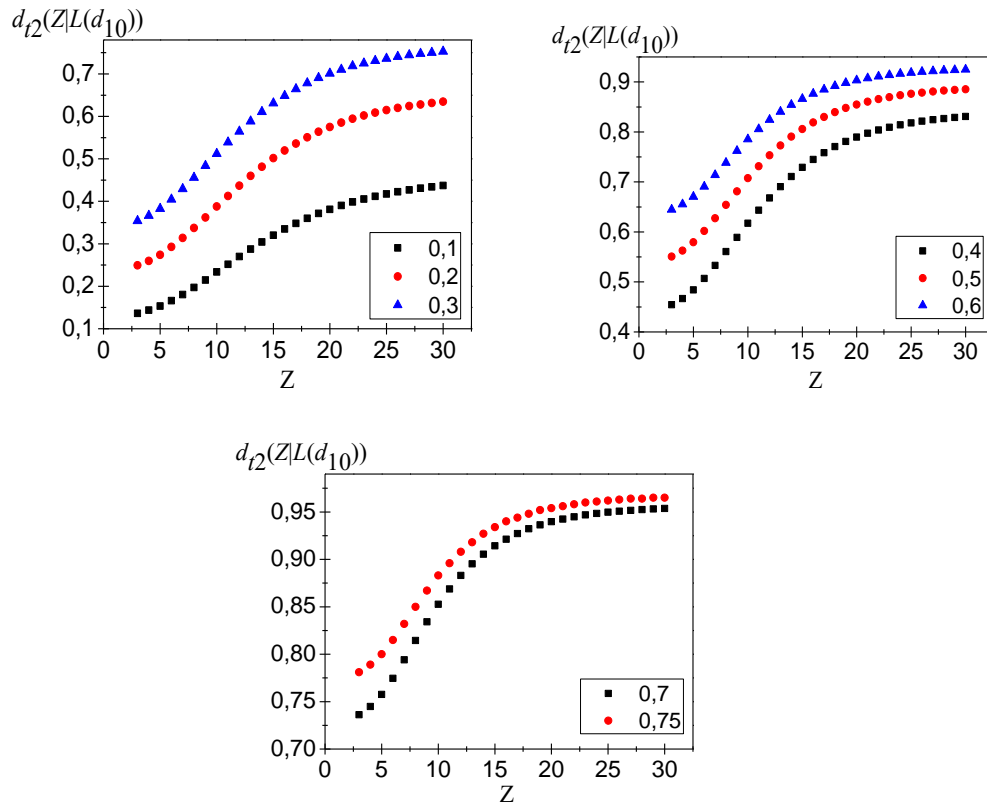


Рисунок 3.5 – Графики функции $d_{t2}(Z|L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,75$

Таблица 3.13 – Значения параметров тестовых объектов контроля и соответствующие им значения теоретических радиационных прозрачностей для первого (переднего) детектора

Z_t	Параметры	d_{s2}							
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
6	$(\rho H)_t, \text{г/см}^2$	15,042	10,496	7,844	5,966	4,51	3,323	2,319	1,45
	$d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,055	0,125	0,206	0,296	0,393	0,498	0,611	0,732
13	$(\rho H)_t, \text{г/см}^2$	12,9327	8,9331	6,6312	5,0169	3,7766	2,7715	1,9279	1,2021
	$d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0252	0,061	0,1061	0,1613	0,2284	0,3101	0,4105	0,5376
26	$(\rho H)_t, \text{г/см}^2$	6,171	4,0422	2,8902	2,1211	1,5552	1,1146	0,7585	0,4632
	$d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0136	0,0334	0,059	0,0916	0,133	0,1872	0,2613	0,3697

Из таблицы 3.13 видно, что все тестовые ОК включаются, как отдельное подмножество, во множество допустимых решений $D(Z, \rho H)$. Кроме того, согласно таблице 3.13, тестовый ОК может быть описан не только как пара $(Z_t, (\rho H)_t)$, но и как пара (Z_t, d_{s2}) . При этом монотонное уменьшение массовой толщины $(\rho H)_t$ эквивалентно монотонному увеличению радиационной прозрачности d_{s2} .

Шаг 9. Выберем в качестве базового тестового объекта контроля углерод ($Z_{tb} = 6$) с массовой толщиной $(\rho H)_{tb} = 15,042$ г/см², что соответствует базовому значению теоретической радиационной прозрачности для второго (заднего) детектора равному $d_{b2} = 0,1$. Параметры базового тестового ОК представлены в таблице 3.13 и выделены жирным шрифтом.

Шаг 10. Положим $\sigma_b(\Phi_2) = 0,0025; 0,005; 0,01; 0,03$.

Шаги 11, 12 Результаты вычисления значений СКО шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых ОК для всех выбранных (на шаге 10) базовых значений $\sigma_b(\Phi_2)$ СКО шума Φ_2 показаны в таблице 3.14.

Шаги 13–17. При выполнении шагов 13–17 будем использовать математическое программное обеспечение «MathCad» для числа моделирований $n = 10000$. Полученные результаты представлены в таблице 3.15, а также на рисунке 3.7.

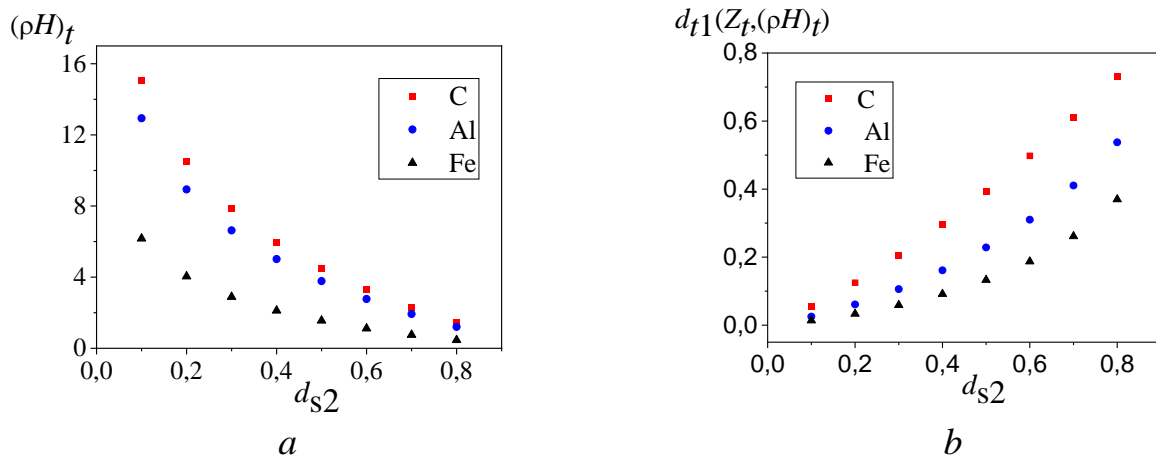


Рисунок 3.6 – Зависимость массовой толщины $(\rho H)t$ тестового ОК от радиационной прозрачности d_{s2} для разных тестовых ОК – *a*; зависимость прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t)$ тестового ОК от радиационной прозрачности d_{s2} для разных тестовых ОК – *b*

Таблица 3.14 – СКО шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых ОК при разных базовых значениях СКО шума Φ_2

Z_t	$\sigma_b(\Phi_2)$	СКО	d_{s2}							
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
6	0,0025	$\sigma(\Phi_2)$	0,0025	0,0035	0,0043	0,0049	0,0055	0,006	0,0065	0,007
	0,005		0,005	0,007	0,0086	0,0099	0,011	0,0121	0,013	0,0139
	0,01		0,01	0,0141	0,0172	0,0198	0,0221	0,0242	0,0261	0,0278
	0,03		0,03	0,0422	0,0515	0,0594	0,0663	0,0725	0,0782	0,0835
	0,0025	$\sigma(\Phi_1)$	0,0009	0,0014	0,0017	0,002	0,0023	0,0026	0,0029	0,0031
	0,005		0,0018	0,0027	0,0035	0,0041	0,0047	0,0052	0,0057	0,0062
	0,01		0,0037	0,0055	0,0069	0,0082	0,0093	0,0104	0,0114	0,0124
	0,03		0,0111	0,0164	0,0207	0,0245	0,028	0,0312	0,0343	0,0372
13	0,0025	$\sigma(\Phi_2)$	0,0026	0,0036	0,0044	0,005	0,0056	0,0061	0,0066	0,007
	0,005		0,0051	0,0072	0,0087	0,01	0,0111	0,0122	0,0131	0,014
	0,01		0,0102	0,0143	0,0174	0,02	0,0223	0,0243	0,0262	0,0279
	0,03		0,0307	0,043	0,0523	0,0601	0,0669	0,073	0,0786	0,0838
	0,0025	$\sigma(\Phi_1)$	0,0007	0,0011	0,0014	0,0017	0,002	0,0022	0,0025	0,0028
	0,005		0,0014	0,0022	0,0028	0,0034	0,0039	0,0045	0,005	0,0056
	0,01		0,0029	0,0043	0,0056	0,0067	0,0078	0,009	0,0101	0,0113
	0,03		0,0086	0,013	0,0167	0,0202	0,0235	0,0269	0,0303	0,0339
26	0,0025	$\sigma(\Phi_2)$	0,0027	0,0037	0,0045	0,0051	0,0057	0,0062	0,0066	0,007
	0,005		0,0054	0,0074	0,009	0,0103	0,0114	0,0124	0,0133	0,0141
	0,01		0,0107	0,0149	0,018	0,0205	0,0228	0,0247	0,0265	0,0282
	0,03		0,0321	0,0446	0,0539	0,0616	0,0683	0,0742	0,0796	0,0845
	0,0025	$\sigma(\Phi_1)$	0,0006	0,0009	0,0011	0,0014	0,0016	0,0019	0,0022	0,0025
	0,005		0,0012	0,0018	0,0023	0,0028	0,0033	0,0038	0,0043	0,005
	0,01		0,0023	0,0035	0,0046	0,0056	0,0065	0,0076	0,0087	0,01
	0,03		0,007	0,0106	0,0137	0,0167	0,0196	0,0227	0,0261	0,0299

Из полученных результатов можно сделать вывод, что погрешность оценки атомного номера для разных материалов имеет сильную зависимость от квантовых шумов. При этом наблюдаются следующие особенности в изменении данной погрешности:

– погрешность оценки атомного номера строго возрастает при возрастании уровней шумов (что естественно и вполне закономерно);

– для ОК из материала с низким атомным номером (углерод) данная погрешность имеет максимальное значение при минимальной массовой толщине ОК (что равносильно максимальному значению радиационной прозрачности ОК);

– для ОК из материала со средним (алюминий) или высоким (железо) атомным номером погрешность имеет максимальное значение при максимальной

массовой толщине ОК (что равносильно минимальному значению радиационной прозрачности ОК);

– погрешность оценки атомного номера увеличивается при увеличении атомного номера материала ОК.

Таблица 3.15 – Среднее значение Z_m , погрешности m_z и δ_z оценки атомного номера для разных тестовых ОК в зависимости от базового значения $\sigma_b(\Phi_2)$ СКО шума Φ_2

Z_t	$\sigma_b(\Phi_2)$		d_{s2}							
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
6	0,0025	Z_m	5,99	5,99	5,99	5,96	5,85	5,98	6	5,99
		m_z	0,3	0,24	0,23	0,41	0,77	0,31	0,3	0,42
		$\delta_z, \%$	4,95	3,94	3,78	6,93	13,21	5,15	5,05	6,94
	0,005	Z_m	5,97	5,99	5,97	5,96	5,87	5,98	5,97	5,95
		m_z	0,62	0,5	0,51	0,55	0,8	0,54	0,62	0,88
		$\delta_z, \%$	10,45	8,3	8,54	9,29	13,57	9	10,41	14,75
	0,01	Z_m	5,89	5,91	5,93	5,94	5,85	5,91	5,87	5,8
		m_z	1,32	1,05	1	0,98	1,11	1,13	1,35	1,82
		$\delta_z, \%$	22,34	17,83	16,83	16,58	19	19,11	23	31,45
	0,03	Z_m	6,16	6	5,95	5,91	5,91	6,01	6,1	6,6
		m_z	3,17	2,64	2,49	2,49	2,6	2,88	3,44	4,7
		$\delta_z, \%$	51,5	44	41,8	42,07	44,02	47,87	56,32	71,1
13	0,0025	Z_m	13,01	13,01	13,01	13,01	13	13	13,01	13,03
		m_z	0,54	0,38	0,32	0,29	0,29	0,3	0,33	0,43
		$\delta_z, \%$	4,12	2,95	2,48	2,25	2,19	2,28	2,55	3,31
	0,005	Z_m	13,06	13,02	13,02	13,01	13,01	13,02	13,02	13,05
		m_z	1	0,71	0,6	0,56	0,55	0,59	0,65	0,84
		$\delta_z, \%$	7,69	5,48	4,59	4,27	4,2	4,53	5,01	6,44
	0,01	Z_m	13,24	13,09	13,05	13,07	13,06	13,04	13,09	13,17
		m_z	2,2	1,47	1,2	1,1	1,09	1,15	1,35	1,79
		$\delta_z, \%$	16,62	11,25	9,17	8,4	8,34	8,8	10,32	13,56
	0,03	Z_m	15,12	14,09	13,72	13,59	13,67	13,77	13,75	14,03
		m_z	7,98	5,73	4,49	3,88	4	4,13	4,45	5,19
		$\delta_z, \%$	52,75	40,68	32,73	28,57	29,25	29,97	32,33	36,96
26	0,0025	Z_m	26,3	26,17	26,17	26,05	25,66	26,58	24,53	24
		m_z	2,53	1,86	1,65	1,23	1,14	0,85	0,92	1,12
		$\delta_z, \%$	9,64	7,09	6,32	4,71	4,43	3,21	3,74	4,66
	0,005	Z_m	26,39	26,41	26,48	25,98	25,45	26,12	24,61	23,53
		m_z	4	3,27	3	2,17	1,81	1,82	1,57	1,62
		$\delta_z, \%$	15,15	12,4	11,34	8,37	7,09	6,96	6,38	6,87
	0,01	Z_m	25,91	26,28	26,36	25,66	25,05	25,65	24,38	22,84
		m_z	5,63	4,76	4,42	3,36	2,95	3,18	2,55	2,34
		$\delta_z, \%$	21,74	18,11	16,78	13,08	11,78	12,39	10,46	10,26
	0,03	Z_m	23,66	24,69	24,89	23,96	24,08	24,41	22,82	20,93

	m_z	9,01	7,72	7,09	5,75	5,84	5,99	4,92	4,26
	$\delta_z, \%$	38,09	31,26	28,48	24,01	24,24	24,54	21,56	20,35

Из таблицы 3.15 и рисунка 3.7 следует, что погрешность m_z (как и δ_z) является немонотонной зависимостью от массовой толщины (радиационной прозрачности) объекта контроля.

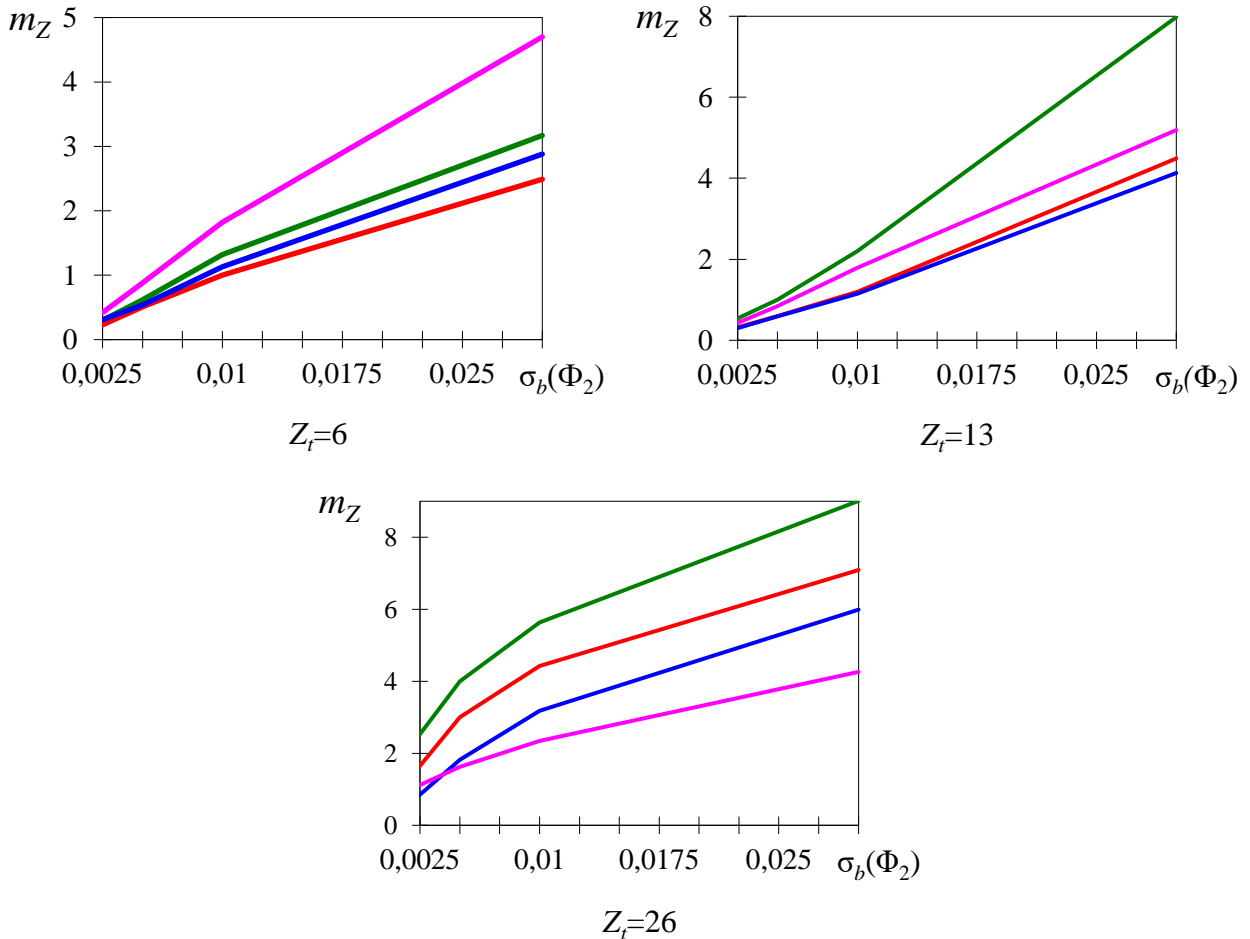


Рисунок 3.7 – Среднеквадратические погрешности m_z оценок атомных номеров материалов для разных тестовых объектов контроля: — $d_{s2}=0,1$; — $d_{s2}=0,3$; — $d_{s2}=0,6$; — $d_{s2}=0,8$

Аналогичная немонотонность оказалась характерной и для традиционной (классической) схемы реализации МДЭ, что объясняется, главным образом, поведением обратной зависимости $Z=Z(d_{t1}, d_{t2})$, т. е. зависимости атомного номера от радиационных прозрачностей ОК [93].

3.3 Выводы к главе 3

1. В ходе выполненных исследований представлены аналитические

описания множества допустимых решений и множества тестовых объектов контроля для метода дуальных энергий применительно к рентгеновским системам досмотрового контроля с сэндвич-детекторами излучения.

2. Для данных систем создан алгоритм оценки погрешностей определения атомного номера, порожденных квантовым шумом, при распознавании материалов на основе метода дуальных энергий и проиллюстрировано его действие на конкретном примере.
3. Созданный алгоритм может быть использован в дальнейшем, в частности, для оптимизации сэндвич-детекторов излучения из условия минимума погрешности распознавания материалов, порожденной квантовым шумом.

ГЛАВА 4. АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В [103] был разработан алгоритм оценки погрешностей эффективного атомного номера (ЭАН) при распознавании материалов в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения. В данной главе, на основе алгоритма оценки погрешностей ЭАН, предлагается новый алгоритм, предназначенный для оптимизации таких параметров сэндвич-детектора излучения как ЭАН, толщины первого детектора и толщины промежуточного фильтра. Критерием оптимальности является минимум погрешности оценки ЭАН методом дуальных энергий, порождаемой квантовой природой рентгеновского излучения.

4.1 Алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов по критерию минимума погрешности оценки эффективного атомного номера методом дуальных энергий

Сэндвич-детектор состоит из радиационно-чувствительных элементов (РЧЭ) первого и второго детекторов и промежуточного фильтра. Параметрам РЧЭ первого детектора присвоим индекс «1», параметрам РЧЭ второго детектора – индекс «2», а параметрам промежуточного фильтра – индекс « f ». Индекс будет отсутствовать при описании параметров объекта контроля. Каждый из структурных элементов сэндвич-детектора и объект контроля характеризуется ЭАН материала Z и массовой толщиной ρH . Под массовой толщиной ρH объекта или РЧЭ понимается произведение плотности ρ соответствующего материала на его толщину H .

Для формализации записи и облегчения перевода в программный код все варьируемые параметры алгоритма сведем в матрицу параметров \mathbf{P}

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} Z_1 & Z_f & Z_2 \\ \rho_1 H_1 & \rho_f H_f & \rho_2 H_2 \end{pmatrix}$$

Алгоритм оптимизации можно представить в виде совокупности нескольких этапов.

Шаг 1. Назначается максимальная энергия E_0 рентгеновского излучения.

Шаг 2. Определяется числовой энергетический спектр $g(E, E_0)$ источника рентгеновского излучения.

Шаг 3. Задаётся матрица параметров сэндвич-детектора \mathbf{P} .

Шаг 4. Указывается диапазон изменения ЭАН Z материалов ОК, $Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}$, подлежащих распознаванию методом дуальных энергий.

Шаг 5. Устанавливаются нижняя d_{\min} и верхняя d_{\max} границы радиационной прозрачности ОК.

Шаг 6. Строится множество допустимых значений параметров ОК $\mathbf{D}(\mathbf{P}) \subset \mathbb{R}^2$ с учётом ограничений 4 и 5 этапов:

$$\mathbf{D}(\mathbf{P}) = \left\{ (Z, \rho H) \mid Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}, d_{\min} \leq d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{(1)}) < d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P}) \leq d_{\max} \right\}$$

здесь $\mathbf{P}^{(1)}$ – первый столбец матрицы \mathbf{P} ; $d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{(1)})$, $d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P})$ – теоретические значения радиационных прозрачностей ОК, соответствующие первому и второму детекторам сэндвича, и вычисляемые по формулам, аналогичным приведённым в [83]:

$$d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{(1)}) = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) \bar{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \bar{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) dE}$$

$$d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P}) = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-m(E, Z)\rho H - \sum_{i=1}^2 m(E, P_{1i})P_{2i}\right) \bar{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E, \mathbf{P}^{(3)}) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-\sum_{i=1}^2 m(E, P_{1i})P_{2i}\right) \bar{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E, \mathbf{P}^{(3)}) dE}$$

где $m(E, Z), m(E, P_{11}), m(E, P_{12})$ – массовые коэффициенты ослабления (МКО) фотонов с энергией E для материалов ОК, РЧЭ первого детектора и промежуточного фильтра соответственно, $\text{см}^2/\text{г}$; $\bar{E}_{ab1}(E), \bar{E}_{ab2}(E)$ – средние значения поглощенной энергии зарегистрированного фотона кванту с энергией E , для РЧЭ первого и

второго детекторов соответственно, МЭВ; $\varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) = 1 - \exp(-m(E, P_{11})P_{21})$, $\varepsilon_2(E, \mathbf{P}^{(3)}) = 1 - \exp(-m(E, P_{13})P_{23})$ – эффективности регистрации квантов излучения с энергией E для РЧЭ первого и второго детекторов; $\mathbf{P}^{(3)}$ — третий столбец матрицы \mathbf{P} .

Из описания множества $\mathbf{D}(\mathbf{P})$ следует, что уравнения

$$d_{r1}(Z, (\rho H)_{\max}(Z), \mathbf{P}^{(1)}) = d_{\min}, \quad d_{r2}(Z, (\rho H)_{\min}(Z), \mathbf{P}) = d_{\max}$$

для фиксированного значения Z определяют для заданной матрицы параметров \mathbf{P} минимальное $(\rho H)_{\min}(Z)$ и максимальное $(\rho H)_{\max}(Z)$ допустимые значения массовых толщины ОК.

Шаг 7. Производится повторение с 3 по 6 этап для фиксированных материалов РЧЭ первого и второго детекторов (считаем фиксированными значения ЭАН Z_1 и Z_2) и разных, но заранее определенных, комбинаций значений массовых толщин РЧЭ первого и второго детекторов $\rho_1 H_1$ и $\rho_2 H_2$, а также промежуточного фильтра $\rho_f H_f$.

В результате выполнения данного этапа будет сформирована совокупность множеств допустимых решений $\mathbf{D}(\mathbf{P})$, соответствующих фиксированным значениям ЭАН Z_1, Z_2 и различным комбинациям значений параметров $\rho_1 H_1, \rho_2 H_2, \rho_f H_f$.

Шаг 8. Находится «минимальное множество допустимых решений» $\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$ для фиксированных значений параметров Z_1, Z_2 , которое представляет собой пересечение совокупности множеств $\mathbf{D}(\mathbf{P})$, полученных на этапе 7:

$$\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2) = \bigcap_{\mathbf{P}} \mathbf{D}(\mathbf{P}).$$

Шаг 9. Задаётся множество тестовых ОК $\mathbf{D}_t(Z_1, Z_2)$ для фиксированных значений параметров Z_1, Z_2 как некоторое подмножество минимального множества допустимых решений $\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$, т. е. определяется множество пар $(Z_t, (\rho H)_t)$ из $\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$, где Z_t и $(\rho H)_t$ – соответственно ЭАН материала тестового ОК и его массовая толщина.

Заметим, что задание множества тестовых ОК описанным способом гарантирует принадлежность всех тестовых ОК каждому из множеств допустимых решений $\mathbf{D}(\mathbf{P})$, соответствующих различным, но заранее определенным, комбинациям значений параметров $\rho_1 H_1, \rho_2 H_2, \rho_f H_f$.

Шаг 10. Для каждого тестового ОК вычисляются радиационные прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)})$ и $d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$ для фиксированной тройки значений параметров $\rho_1 H_1, \rho_2 H_2, \rho_f H_f$.

Шаг 11. Задаётся значение параметра

$$\sigma_0 = \sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE} / \sqrt{C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE},$$

здесь C_{id} – обобщенный параметр, характеризующий источник и сэндвич-детектор излучения [83].

Параметр σ_0 представляет собой относительное среднеквадратическое отклонение (СКО) заряда (энергии), регистрируемого идеальным детектором за фиксированный промежуток времени T при отсутствии ОК [93,100]. Идеальный детектор является гипотетическим детектором полного поглощения, причём его поперечные размеры и местоположение идентичны первому детектору.

Выражение для оценки параметра σ_0 представим в соответствии с [93] в следующей эквивалентной форме:

$$\sigma_0 = \frac{\eta}{\sqrt{N_q}},$$

где

$$\eta = \frac{\sqrt{\overline{E^2}}}{\bar{E}} = \sqrt{\frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) dE}} / \sqrt{\frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) dE}}$$

– коэффициент амплитудного разброса поглощённой энергии регистрируемых фотонов для идеального детектора рентгеновского излучения;

$$N_q = C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) dE$$

– среднее число фотонов, регистрируемых идеальным детектором за время T при отсутствии ОК.

Шаг 12. Вычисляется значение СКО $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})$ шума Φ_1 , соответствующего теоретической прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)})$ тестового ОК для РЧЭ первого детектора, основываясь на формулах из [100]:

$$\begin{aligned} \sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)}) &= \frac{\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})}{\sigma_0} \sigma_0 = \\ &= \frac{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_t)(\rho H)_t) \overline{E_{ab1}^2}(E) \varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) dE \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE}}{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) \overline{E_{ab1}}(E) \varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) dE}} \sigma_0. \end{aligned}$$

Шаг 13. Определяется значение СКО $\sigma(\Phi_2, \mathbf{P})$ шума Φ_2 , соответствующего теоретической прозрачности $d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$ тестового ОК для второго детектора, также основываясь на формулах из [100]:

$$\begin{aligned} \sigma(\Phi_2, \mathbf{P}) &= \frac{\sigma(\Phi_2, \mathbf{P})}{\sigma_0} \sigma_0 = \\ &= \frac{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-m(E, Z_t)(\rho H)_t - \sum_{i=1}^2 m(E, P_{li}) P_{2i}\right) \overline{E_{ab2}^2}(E) \varepsilon_2(E, \mathbf{P}^{(3)}) dE \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE}}{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-\sum_{i=1}^2 m(E, P_{li}) P_{2i}\right) \overline{E_{ab2}}(E) \varepsilon_2(E, \mathbf{P}^{(3)}) dE}} \cdot \sigma_0 \end{aligned}$$

Шаг 14. Осуществляется розыгрыш случайных величин – шумов Φ_1 и Φ_2 в предположении их независимости, нормальности распределения, равенства нулю их математических ожиданий и равенства их СКО значениям $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})$ и $\sigma(\Phi, \mathbf{P})$ соответственно.

Шаг 15. Находятся экспериментальные (фактические) уровни радиационных прозрачностей тестового ОК для детекторов сэндвича:

$$d_1(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)}) = d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)}) + \Phi_1;$$

$$d_2(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}) = d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}) + \Phi_2.$$

Шаг 16. Оцениваются параметры Z_t и $(\rho H)_t$ путем решения относительно $(Z, \rho H) \in \mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$ систем уравнений вида:

$$\begin{cases} d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{(1)}) = d_1(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)}), \\ d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P}) = d_2(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}). \end{cases}$$

Шаг 17. Производится n -кратное повторение этапов 14 – 16 для неизменных значений СКО $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})$ и $\sigma(\Phi_2, \mathbf{P})$. В итоге для каждого тестового ОК получается множество $\mathbf{Res} = \{(Z_i, (\rho H)_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$, состоящее из n оценок параметров Z_t и $(\rho H)_t$.

Шаг 18. Для каждого отдельного тестового ОК на основе множества оценок \mathbf{Res} , полученного для него на этапе 17, находятся среднее значения Z_m , СКО m_z и относительные среднеквадратические погрешности δ_z оценки параметра Z_t :

$$Z_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i, \quad m_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_t)^2}, \quad \delta_z = \frac{m_z}{Z_t} \cdot 100\%.$$

Шаг 19. Шаги 10 – 18 повторяются для всевозможных (заранее определенных) комбинаций значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$.

В результате выполнения данного этапа формируются «таблицы погрешностей» оценок ЭАН тестовых ОК. Число таких таблиц равно числу рассмотренных комбинаций анализируемых параметров.

Шаг 20. Находится оптимальная комбинация $((\rho_1 H_1)_{opt}(Z_1, Z_2), (\rho_f H_f)_{opt}(Z_1, Z_2), (\rho_2 H_2)_{opt}(Z_1, Z_2))$ значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$ на основе анализа всей совокупности «таблиц погрешностей», полученных на этапе 19. При этом в качестве оптимальной может считаться та комбинация, для которой максимальная погрешность оценки атомного номера является минимальной (либо максимальная относительная погрешность оценки атомного номера является минимальной), т.е. оптимальность подразумевается по критерию минимакса (наилучшим образом для наихудшего случая).

Шаг 21. Шаги 3 – 20 повторяются для разных (заранее определенных) значений параметров Z_1 , Z_2 .

В результате выполнения данного этапа формируется множество \mathbf{D} , состоящее из элементов вида $(Z_1, Z_2, (\rho_1 H_1)_{opt}(Z_1, Z_2), (\rho_f H_f)_{opt}(Z_1, Z_2), (\rho_2 H_2)_{opt}(Z_1, Z_2))$.

Шаг 22. Находится оптимальная комбинация значений $(Z_{1opt}, Z_{2opt}, (\rho_1 H_1)_{opt}(Z_{1opt}, Z_{2opt}), (\rho_f H_f)_{opt}(Z_{1opt}, Z_{2opt}), (\rho_2 H_2)_{opt}(Z_{1opt}, Z_{2opt}))$ параметров $Z_1, Z_2, \rho_1 H_1, \rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$, т.е. находится оптимальный элемент множества \mathbf{D} на основе анализа «таблиц погрешностей», соответствующих различным элементам данного множества.

Очевидно, что в случае оптимизации параметров $\rho_1 H_1, \rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$ (или H_1, H_2 и H_f) для заданных значений параметров Z_1, Z_2 , следует ограничиться этапами 1 – 20 вышеописанного алгоритма.

Следует отметить, что на основе предлагаемого алгоритма могут быть решены и другие варианты оптимизационных задач: например, задано Z_1 и $\rho_1 H_1$, а оптимизировать $\rho_f H_f$, либо задано Z_1 и $\rho_f H_f$, а оптимизировать $\rho_1 H_1$ и т.д.

Рассмотрим далее конкретные примеры использования данного алгоритма.

4.2. Оптимизация параметров сэндвич-детекторов излучения при использовании радиационно-чувствительных элементов первых детекторов из иодида цезия

Шаг 1. Пусть $E_0=160$ кэВ.

Шаг 2. По аналогии с [86] примем, что

$$g(E, E_0) = C \frac{E_0 - E}{E} \exp(-m(E, Z_g)(\rho H)_g),$$

здесь C – некоторый постоянный множитель; $m(E, Z_g)$ – МКО излучения материалом выходного окна рентгеновской трубки (силикатным стеклом SiO_2 толщиной 1,5 мм) с массовой толщиной $(\rho H)_g$.

Шаг 3. Предположим, учитывая результаты работ [76, 103], что РЧЭ первого (переднего) детектора изготовлен из CsI (при этом основной процесс взаимодействия с излучением – фотоэффект), промежуточный фильтр представляет собой медную пластину, а второй (задний) детектор является

детектором полного поглощения. Исходя из этого, при проведении моделирования будем полагать:

$$\bar{E}_{ab1}(E)/E = \overline{E_{ab1}^2}(E)/E^2 = 1; \varepsilon_2(E) = \bar{E}_{ab2}(E)/E = \overline{E_{ab2}^2}(E)/E^2 = 1.$$

Предположим также, что толщина H_1 РЧЭ первого детектора и толщина H_f промежуточного фильтра могут изменяться следующим образом:

$$H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}; H_f = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1 \text{ мм}.$$

Соответственно при этом:

$$\rho_1 H_1 = 0,0451; 0,09; 0,135; 1,8; 0,226 \text{ г/см}^2; \rho_f H_f = 0,27; 0,45; 0,63; 0,81; 0,99 \text{ г/см}^2.$$

Таким образом, всего имеем 25 различных комбинаций (пар) значений параметров H_1 и H_f (или, что равносильно, 25 пар значений параметров $\rho_1 H_1$ и $\rho_f H_f$).

Шаг 4. Положим: $Z_{\min}=3$ (Li), $Z_{\max}=30$ (Zn).

Шаг 5. Положим, по аналогии с [103]:

$$d_{\min} = 1/2^{16} \approx 1,526 \cdot 10^{-5}; d_{\max} = d_{t2}(Z_{\text{Fe}}, (\rho H_{\min})_{\text{Fe}}) = d_{t2}(26; 0,063),$$

где 2^{16} – число уровней квантования аналого-цифровых преобразователей, имеющих разрядность $m=16$; $Z_{\text{Fe}} = 26$ – атомный номер железа; $(\rho H_{\min})_{\text{Fe}} = 0,063 \text{ г/см}^2$ – минимальная массовая толщина стальной проволоочки, которую обнаруживает комплекс досмотрового рентгеновского контроля, описанный в [104].

В таблице 4.1 представлены результаты вычислений прозрачностей d_{\max} для всех 25 различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f , описанных на этапе 3.

Таблица 4.1 – Максимальные теоретические прозрачности для второго (заднего) детектора для различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f

H_f , мм	H_1 , мм				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,95155	0,95874	0,96354	0,96689	0,96929
0,5	0,95909	0,9638	0,96697	0,9693	0,97104
0,7	0,96323	0,96655	0,96894	0,97075	0,97218
0,9	0,96597	0,96848	0,97038	0,97187	0,97307
1,1	0,96798	0,96997	0,97153	0,97278	0,97383

Шаги 6,7. Строим множества допустимых решений для всех выбранных (на этапе 3) 25 комбинаций значений параметров H_1 и H_f .

Границы данных множеств при значениях толщины $H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ мм показаны на рисунках 4.1–4.5. Следует отметить, что $(\rho H)_{\max}(Z)$ зависит только от $\rho_1 H_1$, так как теоретическая прозрачность для первого детектора не зависит от промежуточного фильтра.

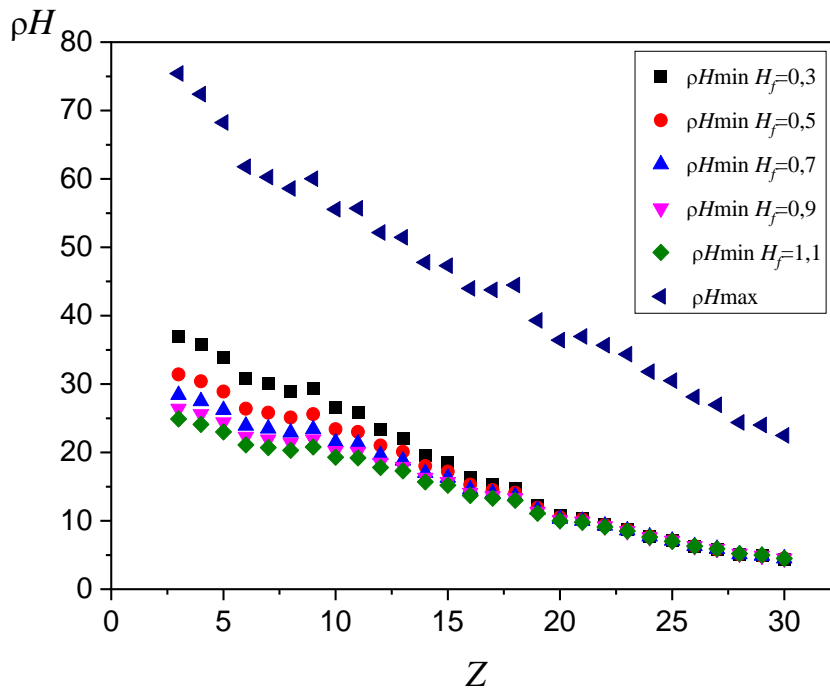


Рисунок 4.1 – Зависимости минимального $(\rho H)_{\min}$ и максимального $(\rho H)_{\max}$ значений массовой толщины объекта контроля от эффективного атомного номера Z при $H_1 = 0,1$ мм для разных значений параметра H_f

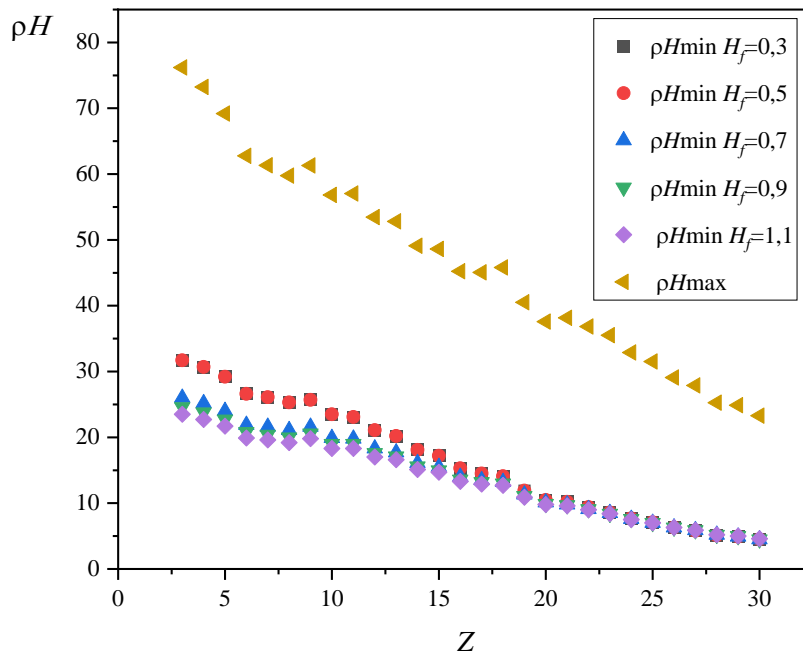


Рисунок 4.2 – Зависимости минимального $(\rho H)_{\min}$ и максимального $(\rho H)_{\max}$ значений массовой толщины объекта контроля от эффективного атомного номера Z при $H_1 = 0.2$ мм для разных значений параметра H_f .

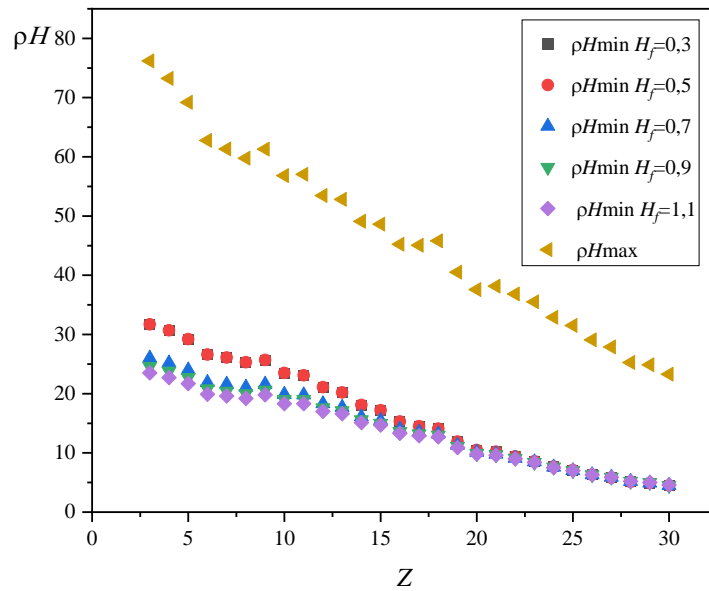


Рисунок 4.3 – Зависимости минимального $(\rho H)_{\min}$ и максимального $(\rho H)_{\max}$ значений массовой толщины объекта контроля от эффективного атомного номера Z при $H_1 = 0.3$ мм для разных значений параметра H_f .

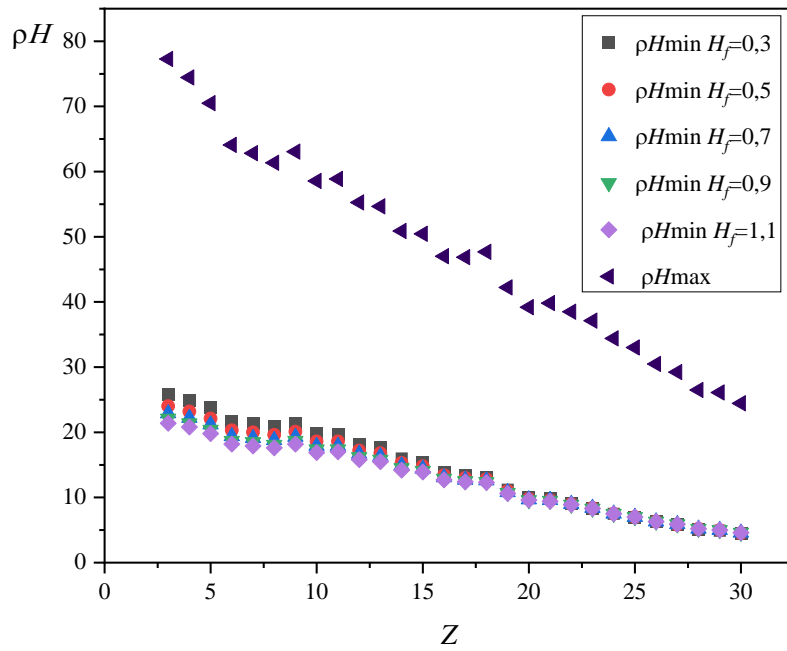


Рисунок 4.4 – Зависимости минимального $(\rho H)_{\min}$ и максимального $(\rho H)_{\max}$ значений массовой толщины объекта контроля от эффективного атомного номера Z при $H_1 = 0,4$ мм для разных значений параметра H_f .

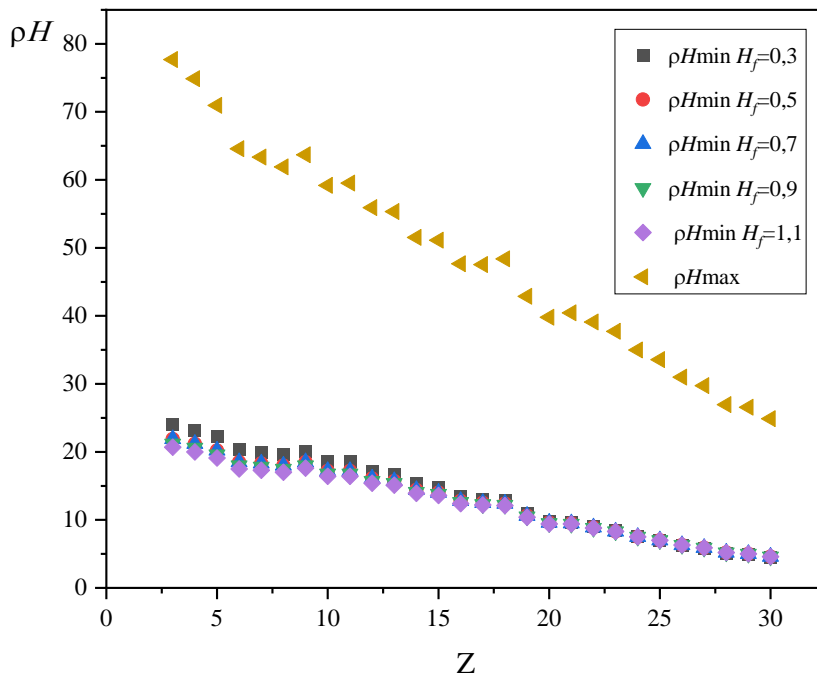


Рисунок 4.5 – Зависимости минимального $(\rho H)_{\min}$ и максимального $(\rho H)_{\max}$ значений массовой толщины объекта контроля от эффективного атомного номера Z при $H_1 = 0,5$ мм для разных значений параметра H_f .

Шаг 8. Находим верхнюю $(\rho H)_+(Z)$ и нижнюю $(\rho H)_-(Z)$ границы «минимального множества допустимых решений» $D_0(Z_1)$ для целочисленных значений Z (таблица 4.2, рисунок 4.6), учитывая, что $3 \leq Z \leq 30$:

$$(\rho H)_+(Z) = \min_{H_1} \{(\rho H)_{\max}(Z) | H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}\};$$

$$(\rho H)_-(Z) = \max_{H_1, H_f} \{(\rho H)_{\min}(Z) | H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}; H_f = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1 \text{ мм}\}.$$

Таблица 4.2 – Нижняя $(\rho H)_-(Z)$ и верхняя $(\rho H)_+(Z)$ границы «минимального множества допустимых решений» $D_0(Z_1)$ для целочисленных значений Z

Z	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,37	0,358	0,339	0,309	0,301	0,29	0,293	0,266	0,259
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	75,401	72,387	68,243	61,774	60,25	58,589	60,013	55,561	55,696
Z	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,234	0,221	0,196	0,185	0,163	0,153	0,147	0,123	0,108
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	52,146	51,464	47,808	47,296	43,979	43,765	44,463	39,302	36,419
Z	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,104	0,095	0,088	0,077	0,071	0,063	0,059	0,052	0,05
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	36,957	35,673	34,364	31,807	30,483	28,116	26,945	24,388	24,009

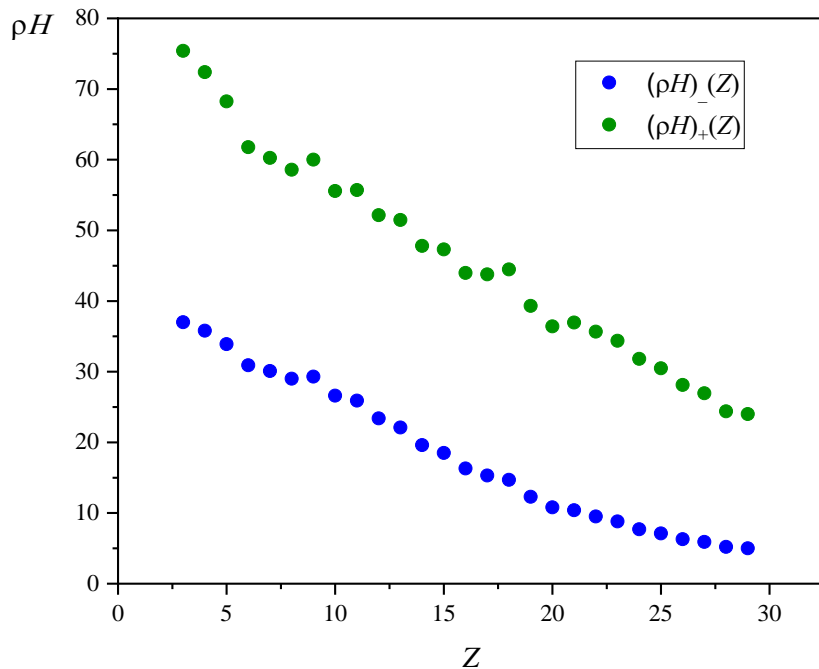


Рисунок 4.6 – Границы $(\rho H)_-(Z)$ и $(\rho H)_+(Z)$ $D_0(Z_1)$ для Z

Используя линейную интерполяцию, найдем верхнюю и нижнюю границы «минимального множества допустимых решений» для нецелочисленных значений Z .

Строим и запоминаем в дискретизированной форме полноформатное «минимальное множество допустимых решений» $\mathbf{D}_0(Z_1)$. При этом дискретизация по Z и по ρH происходит соответственно с шагом 0,1 и 0,1 г/см².

Шаги 9, 10. В качестве тестовых материалов возьмем С, Al и Fe. В таблице 4.3 приведены соответствующие этим материалам массовые толщины. Там же, в качестве примера, приведены теоретические радиационные прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)})$ и $d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$, соответствующие первому и второму детекторам для пары значений: $H_1=0,1$ мм; $H_f=0,3$ мм (или, что равносильно, для пары значений: $\rho_1 H_1=0,0451$ г/см²; $\rho_f H_f=0,27$ г/см²).

Таблица 4.3 – Атомные номера, массовые толщины тестовых ОК и их теоретические радиационные прозрачности, соответствующие первому и второму детекторам при $H_1=0,1$ мм; $H_f=0,3$ мм

$Z_i=6$	Радиационные прозрачности	$(\rho H)_t, \text{ г/см}^2$				
		1	2	5	10	20
	$d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)})$	0,7881	0,6289	0,3333	0,124	0,0191
	$d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$	0,8513	0,7249	0,4484	0,2024	0,042
$Z_i=13$	Радиационные прозрачности	$(\rho H)_t, \text{ г/см}^2$				
		0,7	1,5	3	6	15
	$d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)})$	0,6156	0,4275	0,2443	0,0975	0,0115
	$d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$	0,856	0,721	0,5287	0,2927	0,0561
$Z_i=26$	Радиационные прозрачности	$(\rho H)_t, \text{ г/см}^2$				
		0,3	0,6	1,5	4	10
	$d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)})$	0,4051	0,2498	0,0998	0,0227	0,0022
	$d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$	0,8048	0,6696	0,4208	0,1518	0,0223

Шаг 11. Параметр σ_0 зададим следующими значениями: 0,001; 0,003; 0,01; 0,03.

Шаги 12, 13. Результаты вычислений СКО $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})$ шума Φ_1 и СКО $\sigma(\Phi_2, \mathbf{P})$ шума Φ_2 для всех выбранных на этапе 11 значений параметра σ_0 при $H_1 = 0,1$ мм и $H_f = 0,3$ мм представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 при $H_1 = 0,1$ мм и $H_f = 0,3$ мм

Z_t	σ_0	СКО	$(\rho H)_r, \text{г/см}^2$				
			1	2	5	10	20
6	0,001	$\sigma(\Phi_1)$	0,0013	0,0012	0,0009	0,0006	0,0002
	0,003		0,004	0,0037	0,0027	0,0017	0,0007
	0,01		0,0134	0,0122	0,0091	0,0058	0,0024
	0,03		0,0403	0,0365	0,0274	0,0173	0,0071
	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,0016	0,0015	0,0012	0,0008	0,0004
	0,003		0,0048	0,0045	0,0035	0,0024	0,0011
	0,01		0,0161	0,0149	0,0118	0,008	0,0037
	0,03		0,0483	0,0447	0,0354	0,024	0,0111
Z_t	σ_0	СКО	$(\rho H)_r, \text{г/см}^2$				
13	0,001	$\sigma(\Phi_1)$	0,7	1,5	3	6	15
	0,003		0,0013	0,0011	0,0009	0,0006	0,0002
	0,01		0,0038	0,0033	0,0026	0,0017	0,0006
	0,03		0,0126	0,0108	0,0086	0,0057	0,0022
	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,0377	0,0325	0,0257	0,0172	0,0065
	0,003		0,0016	0,0015	0,0013	0,001	0,0004
	0,01		0,0049	0,0045	0,0039	0,003	0,0013
	0,03		0,0162	0,015	0,013	0,0099	0,0045
26	0,001	$\sigma(\Phi_1)$	0,0487	0,045	0,039	0,0296	0,0134
	0,003		0,3	0,6	1,5	4	10
	0,01		0,0011	0,0009	0,0006	0,0003	0,0001
	0,03		0,0033	0,0027	0,0019	0,001	0,0003
	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,0109	0,009	0,0062	0,0032	0,0011
	0,003		0,0326	0,027	0,0185	0,0096	0,0033
	0,01		0,0016	0,0015	0,0012	0,0008	0,0003
	0,03		0,0048	0,0044	0,0036	0,0023	0,0009
26	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,016	0,0148	0,0121	0,0076	0,003
	0,003		0,016	0,0148	0,0121	0,0076	0,003
	0,01		0,0479	0,0444	0,0362	0,0227	0,0091
	0,03		0,0479	0,0444	0,0362	0,0227	0,0091

Шаги 14–20. Выполнение шагов 14–20 осуществлялось в пакете «MathCad», где производилось $n=10000$ моделирование значений шумов Φ_1 и Φ_2 для каждого значения параметра σ_0 для каждого тестового ОК и каждой комбинации значений параметров H_1, H_f . Соответствующие результаты

отображены в таблицах 4.5 – 4.7. В любой внутренней ячейке данных таблиц приведены три числа, разделенные наклонными линиями. Первое число означает максимальное значение СКО, второе – максимальное значение относительной среднеквадратической погрешности, а третье – соответствующую им массовую толщину тестового ОК. Так, например, в таблице 4.5 для $H_1=0,1$ мм, $H_f=0,3$ мм и $\sigma_0=0,001$ приведена тройка чисел 0,12/1,95/1. Это означает: $(m_z)_{\max}=0,12$; $(\delta_z)_{\max}=1,95\%$; $(\rho H)_t=1$ г/см².

Таблица 4.5 – Максимальные погрешности оценки эффективного атомного номера для ОК ($Z_t=6$) при изменении H_1 и H_f

H_f , мм	σ_0	H_1 , мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,001	0,12/1,95/1	0,14/2,27/1	0,16/2,6/1	0,18/2,92/1	0,19/3,25/1
	0,003	0,35/5,8/1	0,41/7,4,91/1	0,47/7,76/1	0,53/8,88/1	0,59/9,78/1
	0,01	1,31/21,8/1	1,52/25,4/1	1,73/28,86/1	1,92/31,94/1	2,08/34,67/1
	0,03	5,23/87,22/20	4,49/74,91/1	5,13/85,41/1	5,76/95,9/1	6,28/104,63/1
0,5	0,001	0,12/2,07/1	0,15/2,41/1	0,16/2,71/1	0,19/3,1/1	0,2/3,4/1
	0,003	0,37/6,14/1	1,14/18,94/2	0,49/8,22/1	0,56/9,27/1	0,62/10,4/1
	0,01	1,39/23,1/1	1,61/26,87/1	1,81/30,22/1	2,22/36,92/1	2,17/36,18/1
	0,03	5,05/84,18/20	4,88/81,3/1	5,44/90,64/1	6,13/102,2/1	6,67/111,2/1
0,7	0,001	0,13/2,2/1	0,15/2,54/1	0,18/2,93/1	0,19/3,24/1	0,22/3,6/1
	0,003	0,39/6,52/1	0,46/7,67/1	0,64/10,73/1	0,59/9,88/1	0,66/10,9/1
	0,01	1,47/24,47/1	1,69/28,19/1	2,98/49,69/1	2,09/34,86/1	2,26/37,66/1
	0,03	4,94/82,37/20	5,28/87,95/1	6,06/100,95/1	6,47/107,9/1	7,04/117,4/1
0,9	0,001	0,14/6,9/1	0,16/2,7/1	0,18/3,08/1	0,21/3,42/1	0,23/3,76/1
	0,003	0,41/6,9/1	0,48/8,06/1	0,55/9,22/1	0,63/10,5/1	0,7/11,62/1
	0,01	1,56/25,3/1	2,09/34,83/1	1,99/33,33/1	2,18/36,33/1	2,36/39,28/1
	0,03	5,04/84,05/1	5,72/95,39/1	6,27/104,6/1	6,85/114,2/1	7,31/121,8/1
1,1	0,001	0,15/2,46/1	0,17/2,84/1	0,19/3,22/1	0,23/3,81/2	0,27/4,56/2
	0,003	0,44/7,3/1	0,52/8,59/1	0,59/9,81/1	0,75/12,4/2	0,74/12,35/1
	0,01	1,89/31,42/1	3,17/52,86/1	2,09/34,84/1	2,29/38,2/1	2,44/40,7/1
	0,03	5,53/92,24/1	6,25/104,16/1	6,67/111,1/1	7,28/121,27/1	7,66/127,7/1

Таблица 4.6 – Максимальные погрешности оценки эффективного атомного номера для ОК ($Z_t=13$) при изменении H_1 и H_f

H_f , мм	σ_0	H_1 , мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,001	0,32/2,44/15	0,27/2,08/15	0,26/1,96/15	0,25/1,9/15	0,25/1,923/15
	0,003	0,78/5,99/15	0,66/5,1/15	0,63/4,86/15	0,63/4,87/15	0,63/4,83/15
	0,01	3,44/26,47/15	2,49/19,12/15	2,23/17,2/15	2,25/17,34/0,7	2,61/20,1/0,7
	0,03	9,27/71,29/15	8,39/64,52/15	8,2/61,6/15	7,74/59,6/15	7,82/60,18/0,7
0,5	0,001	0,3/2,34/15	0,26/2,02/15	0,25/1,9/15	0,25/1,9/15	0,25/1,92/15

	0,003	0,75/5,74/15	0,65/4,97/15	0,62/4,8/15	0,62/4,76/15	0,65/4,98/0,7
	0,01	3,24/24,91/15	2,38/18,34/15	2,2/16,9/15	2,5/19,25/0,7	2,77/21,3/0,7
	0,03	9,12/70,18/15	8,27/63,61/15	8,03/61,8/15	7,79/59,93/15	8,2/63,04/0,7
0,7	0,001	0,29/2,27/15	0,26/1,98/15	0,24/1,88/15	0,25/1,9/15	0,25/1,91/15
	0,003	0,72/5,56/15	0,65/4,97/15	0,63/4,82/15	0,63/4,83/0,7	0,68/5,23/0,7
	0,01	3,08/23,67/15	2,24/17,9/15	2,34/18,04/0,7	2,66/20,5/0,7	3,2/23,1/0,7
	0,03	9,01/69,31/15	8,18/62,9/15	7,88/60,6/15	7,9/61,48/0,7	8,4/65,52/0,7
0,9	0,001	0,29/2,21/15	0,25/1,94/15	0,25/1,9/15	0,24/1,9/15	0,25/1,92/15
	0,003	0,71/5,43/15	0,63/4,81/15	0,61/4,7/15	0,66/5,1/0,7	0,72/5,51/0,7
	0,01	2,95/22,68/15	2,29/17,57/0,7	2,6/19,9/0,7	2,81/21,63/0,7	3,19/24,55/0,7
	0,03	8,93/68,66/15	8,1/62,4/15	7,82/60,15/15	8,18/62,93/0,7	8,7/67,01/0,7
1,1	0,001	0,28/2,17/15	0,25/1,91/15	0,25/1,89/15	0,24/1,87/15	0,25/1,91/15
	0,003	0,69/5,32/15	0,62/4,79/15	0,64/4,93/0,7	0,69/5,32/0,7	0,76/5,8/0,7
	0,01	2,84/21,89/15	2,48/19,11/0,7	2,76/21,23/0,7	3,13/24,09/0,7	3,34/25,7/0,7
	0,03	8,86/68,17/15	8,03/61,8/15	8,02/61,7/0,7	8,5/65,2/0,7	8,9/68,5/0,7

Таблица 4.7 – Максимальные погрешности оценки эффективного атомного номера для ОК ($Z_f=26$) при изменении H_1 и H_f

H_f , мм	σ_0	H_1 , мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,001	2,57/9,9/10	1,99/7,64/10	1,74/6,68/10	1,56/5,99/10	1,45/5,57/10
	0,003	4,87/18,72/10	4,25/16,36/10	3,96/15,22/10	3,77/14,5/10	3,63/13,94/10
	0,01	7,81/30,4/10	7,16/27,53/10	6,82/26,45/10	6,62/25,47/10	6,55/25,18/10
	0,03	11,04/42,45/10	10,62/40,83/10	10,42/40,29/10	10,32/39,7/10	10,33/39,73/10
0,5	0,001	2,49/9,58/10	1,92/7,4/10	1,66/6,39/10	1,51/5,8/10	1,42/5,47/10
	0,003	4,78/18,37/10	4,18/16,07/10	3,92/15,6/10	3,7/14,24/10	3,63/13,96/10
	0,01	7,68/29,55/10	7,06/27,16/10	6,74/25,91/10	6,61/25,39/10	6,41/24,64/10
	0,03	10,89/41,89/10	10,51/40,42/10	10,31/39,67/10	10,31/39,65/10	10,16/39,06/10
0,7	0,001	2,42/9,3/10	1,88/7,22/10	1,63/6,28/10	1,48/5,69/10	1,39/5,34/10
	0,003	4,69/18,05/10	4,17/16,02/10	3,85/14,73/10	3,71/14,26/10	3,54/13,62/10
	0,01	7,57/29,13/10	6,91/26,59/10	6,65/25,57/10	6,46/24,86/10	6,46/24,85/10
	0,03	10,78/41,44/10	10,31/39,67/10	10,16/39,07/10	10,13/38,95/10	10,22/39,32/10
0,9	0,001	2,35/9,04/10	1,82/6,98/10	1,57/6,05/10	1,46/5,6/10	1,37/5,27/10
	0,003	4,62/17,76/10	4,05/15,59/10	3,78/14,54/10	3,63/13,94/10	3,56/13,67/10
	0,01	7,48/28,76/10	6,9/26,56/10	6,65/25,57/10	6,47/24,9/10	6,34/24,37/10
	0,03	10,67/41,03/10	10,33/39,73/10	10,23/39,35/10	10,13/38,95/10	10,07/38,74/10
1,1	0,001	2,29/8,8/10	1,82/7,2/10	1,55/5,94/10	1,44/5,55/10	1,36/5,22/10
	0,003	4,55/17,49/10	3,99/15,38/10	3,79/14,56/10	3,58/13,78/10	3,48/13,39/10
	0,01	7,39/28,43/10	6,83/26,27/10	6,52/25,07/10	6,46/24,86/10	6,38/24,53/10
	0,03	10,59/40,72/10	10,24/39,38/10	10,06/38,69/10	10,1/38,82/10	10,06/38,68/10

Из таблиц 4.5 – 4.7 следует, что максимальные относительные погрешности оценки ЭАН достигаются на углероде, т. е. на легких материалах. Исходя из этого, и учитывая тот факт, что тяжелые материалы помимо рентгеновских систем, могут быть дополнительно обнаружены досмотровыми

металлодетекторами, дальнейший процесс оптимизации параметров сэндвич-детекторов целесообразно провести на тестовых материалах с ЭАН равным 7.

Выбор таких тестовых материалов объясняется тем, что многие опасные вещества согласно [8, 37, 76] имеют ЭАН близкий к 7.

Результаты расчетов теоретических радиационных прозрачностей тестовых ОК с ЭАН $Z=7$, соответствующих первому и второму детекторам для разных значений параметров H_1 и H_f представлены в таблицах 4.8 – 4.10.

Таблица 4.8 – Теоретические радиационные прозрачности тестового объекта контроля ($Z=7$, $\rho H = 1$ г/см²) для переднего и заднего детекторов при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм		H_f , мм				
		0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,7589				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,8478	0,8508	0,8525	0,8538	0,8548
0,2	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,7698				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,8507	0,8528	0,8541	0,855	0,8558
0,3	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,7763				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,8528	0,8543	0,8553	0,856	0,8567
0,4	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,7808				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,8543	0,8555	0,8562	0,8569	0,8574
0,5	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,7841				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,8555	0,8564	0,8571	0,8576	0,8581

Таблица 4.9 – Теоретические радиационные прозрачности тестового объекта контроля ($Z=7$ и $\rho H = 5$ г/см²) для переднего и заднего детекторов при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм		H_f , мм				
		0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,3004				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,4402	0,447	0,4513	0,4545	0,457
0,2	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,3128				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,4472	0,4521	0,4553	0,4577	0,4597
0,3	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,3214				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,4523	0,4559	0,4583	0,4603	0,462
0,4	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,3279				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,4561	0,4589	0,4609	0,4626	0,464
0,5	$d_{11}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,3329				
	$d_{12}(Z_t,(\rho H)_t)$	0,4592	0,4614	0,463	0,4645	0,4658

Таблица 4.10 – Теоретические радиационные прозрачности тестового объекта контроля ($Z=7, \rho H = 20 \text{ г/см}^2$) для переднего и заднего детекторов при изменении параметров H_1 и H_f

$H_1, \text{ мм}$		$H_f, \text{ мм}$				
		0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	$d_{11}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0156				
	$d_{12}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0397	0,0415	0,0428	0,0438	0,0447
0,2	$d_{11}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0172				
	$d_{12}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0431	0,0441	0,0449	0,0456	0,0456
0,3	$d_{11}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0184				
	$d_{12}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0432	0,0443	0,0451	0,0458	0,0464
0,4	$d_{11}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0194				
	$d_{12}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0445	0,0453	0,046	0,0466	0,0472
0,5	$d_{11}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0203				
	$d_{12}(Z_t, (\rho H)_t)$	0,0455	0,0462	0,0468	0,0473	0,0478

В таблицах 4.11 – 4.15 приведены результаты расчетов СКО шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля из материала с эффективным атомным номером $Z=7$ при изменении параметров H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0,001; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03$.

Таблица 4.11 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,001$) при изменении параметров H_1 и H_f

$H_1, \text{ мм}$	$H_f, \text{ мм}$	СКО	$(\rho H)_t, \text{ г/см}^2$					
			1	2	5	10	20	
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00133	0,0012	0,00088	0,00055	0,00022	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00161	0,00148	0,00117	0,00079	0,00036	
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00133	0,0012	0,00088	0,00055	0,00022	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00179	0,00165	0,0013	0,00088	0,00041	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00133	0,0012	0,00088	0,00055	0,00022	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00195	0,0018	0,00143	0,00097	0,00045	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00133	0,0012	0,00088	0,00055	0,00022	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0021	0,00195	0,00154	0,00105	0,00049	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00133	0,0012	0,00088	0,00055	0,00022	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00226	0,00209	0,00166	0,00113	0,00053	
	0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00111	0,001	0,00074	0,00047	0,00019
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00181	0,00168	0,00133	0,0009	0,00042
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,00111	0,001	0,00074	0,00047	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00198	0,00183	0,00145	0,00099	0,00046	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,00111	0,001	0,00074	0,00047	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00213	0,00198	0,00157	0,00107	0,0005	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,00111	0,001	0,00074	0,00047	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00229	0,00212	0,00168	0,00115	0,00054	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,00111	0,001	0,00074	0,00047	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00244	0,00226	0,0018	0,00123	0,00058	
0,3		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00103	0,00093	0,0007	0,00044	0,00018
			$\sigma(\Phi_2)$	0,002	0,00186	0,00147	0,001	0,00047
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00103	0,00093	0,0007	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00216	0,002	0,00159	0,00108	0,00051	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00103	0,00093	0,0007	0,00044	0,00018	

	0,9	$\sigma(\Phi_2)$	0,00232	0,00214	0,0017	0,00116	0,00055	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00103	0,00093	0,0007	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00247	0,00229	0,00182	0,00124	0,00058	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00103	0,00093	0,0007	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00262	0,00243	0,00193	0,00132	0,00062	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00099	0,0009	0,00068	0,00043	0,00018	
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_2)$	0,00219	0,00203	0,00161	0,0011	0,00051	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00099	0,0009	0,00068	0,00043	0,00018	
	0,5	$\sigma(\Phi_2)$	0,00234	0,00217	0,00173	0,00118	0,00055	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00099	0,0009	0,00068	0,00043	0,00018	
	0,7	$\sigma(\Phi_2)$	0,00249	0,00231	0,00184	0,00126	0,00059	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00099	0,0009	0,00068	0,00043	0,00018	
	0,9	$\sigma(\Phi_2)$	0,00265	0,00245	0,00195	0,00134	0,00063	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00099	0,0009	0,00068	0,00043	0,00018	
	1,1	$\sigma(\Phi_2)$	0,0028	0,00259	0,00207	0,00142	0,00067	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00066	0,00042	0,00018	
	0,5	0,3	$\sigma(\Phi_2)$	0,00237	0,00219	0,00175	0,00119	0,00056
			$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00066	0,00042	0,00018
0,5		$\sigma(\Phi_2)$	0,00252	0,00234	0,00186	0,00127	0,0006	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00066	0,00042	0,00018	
0,7		$\sigma(\Phi_2)$	0,00267	0,00248	0,00197	0,00135	0,00064	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00066	0,00042	0,00018	
0,9		$\sigma(\Phi_2)$	0,00282	0,00262	0,00209	0,00143	0,00068	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00066	0,00042	0,00018	
1,1		$\sigma(\Phi_2)$	0,00298	0,00276	0,0022	0,00151	0,00072	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00066	0,00042	0,00018	

Таблица 4.12 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,003$) при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_f$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00399	0,00359	0,00265	0,00164	0,00066
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00482	0,00445	0,00351	0,00237	0,00109
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00399	0,00359	0,00265	0,00164	0,00066
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00536	0,00495	0,00391	0,00265	0,00123
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00399	0,00359	0,00265	0,00164	0,00066
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00584	0,0054	0,00428	0,00291	0,00135
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00399	0,00359	0,00265	0,00164	0,00066
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00631	0,00584	0,00463	0,00315	0,00147
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00399	0,00359	0,00265	0,00164	0,00066
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00677	0,00627	0,00498	0,0034	0,00159
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00333	0,003	0,00223	0,0014	0,00057
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00544	0,00503	0,00398	0,0027	0,00125
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00333	0,003	0,00223	0,0014	0,00057
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00594	0,00549	0,00435	0,00296	0,00138
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00333	0,003	0,00223	0,0014	0,00057
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0064	0,00593	0,0047	0,0032	0,00149
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00333	0,003	0,00223	0,0014	0,00057
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00686	0,00635	0,00505	0,00344	0,00161
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00333	0,003	0,00223	0,0014	0,00057
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00731	0,00678	0,00539	0,00368	0,00173
0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,0031	0,0028	0,00209	0,00132	0,00055
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00601	0,00557	0,00441	0,003	0,0014
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,0031	0,0028	0,00209	0,00132	0,00055
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00649	0,00601	0,00477	0,00325	0,00152

	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,0031	0,0028	0,00209	0,00132	0,00055	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00695	0,00643	0,00511	0,00349	0,00164	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,0031	0,0028	0,00209	0,00132	0,00055	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0074	0,00686	0,00545	0,00373	0,00175	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,0031	0,0028	0,00209	0,00132	0,00055	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00785	0,00728	0,0058	0,00397	0,00187	
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00298	0,0027	0,00203	0,00129	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00657	0,00608	0,00483	0,00329	0,00154	
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00298	0,0027	0,00203	0,00129	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00703	0,00651	0,00518	0,00354	0,00166	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00298	0,0027	0,00203	0,00129	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00748	0,00693	0,00552	0,00378	0,00177	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00298	0,0027	0,00203	0,00129	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00794	0,00736	0,00586	0,00401	0,00189	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00298	0,0027	0,00203	0,00129	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00839	0,00778	0,0062	0,00425	0,00201	
	0,5	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00292	0,00264	0,00199	0,00127	0,00054
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00711	0,00658	0,00524	0,00358	0,00168
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,00292	0,00264	0,00199	0,00127	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00756	0,00701	0,00558	0,00382	0,0018	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,00292	0,00264	0,00199	0,00127	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00802	0,00743	0,00592	0,00406	0,00191	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,00292	0,00264	0,00199	0,00127	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00847	0,00786	0,00626	0,0043	0,00203	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,00292	0,00264	0,00199	0,00127	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00894	0,00829	0,00661	0,00454	0,00215	

Таблица 4.13 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,01$) при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_f$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01329	0,01195	0,00883	0,00548	0,00221
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01607	0,01485	0,01171	0,0079	0,00363
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01329	0,01195	0,00883	0,00548	0,00221
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01785	0,0165	0,01305	0,00884	0,00409
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,01329	0,01195	0,00883	0,00548	0,00221
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01947	0,01801	0,01427	0,00969	0,0045
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,01329	0,01195	0,00883	0,00548	0,00221
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02103	0,01947	0,01544	0,01051	0,0049
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,01329	0,01195	0,00883	0,00548	0,00221
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02256	0,02089	0,0166	0,01132	0,00529
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,0111	0,01001	0,00745	0,00466	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01813	0,01676	0,01326	0,00899	0,00416
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,0111	0,01001	0,00745	0,00466	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01978	0,0183	0,01451	0,00986	0,00458
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,0111	0,01001	0,00745	0,00466	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02134	0,01975	0,01568	0,01068	0,00498
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,0111	0,01001	0,00745	0,00466	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02286	0,02117	0,01682	0,01148	0,00537
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,0111	0,01001	0,00745	0,00466	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02438	0,02259	0,01796	0,01228	0,00576
0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01032	0,00933	0,00698	0,0044	0,00183
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02005	0,01855	0,01471	0,01	0,00465
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01032	0,00933	0,00698	0,0044	0,00183

	0,7	$\sigma(\Phi_2)$	0,02163	0,02003	0,0159	0,01084	0,00506	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,01032	0,00933	0,00698	0,0044	0,00183	
	0,9	$\sigma(\Phi_2)$	0,02315	0,02145	0,01705	0,01164	0,00545	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,01032	0,00933	0,00698	0,0044	0,00183	
	1,1	$\sigma(\Phi_2)$	0,02467	0,02285	0,01818	0,01243	0,00584	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,01032	0,00933	0,00698	0,0044	0,00183	
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_2)$	0,02618	0,02426	0,01932	0,01323	0,00623	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00994	0,009	0,00676	0,00429	0,0018	
	0,5	$\sigma(\Phi_2)$	0,02189	0,02027	0,0161	0,01098	0,00513	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00994	0,009	0,00676	0,00429	0,0018	
	0,7	$\sigma(\Phi_2)$	0,02344	0,02171	0,01726	0,01179	0,00553	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00994	0,009	0,00676	0,00429	0,0018	
	0,9	$\sigma(\Phi_2)$	0,02494	0,02311	0,01839	0,01258	0,00591	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00994	0,009	0,00676	0,00429	0,0018	
	1,1	$\sigma(\Phi_2)$	0,02646	0,02452	0,01953	0,01338	0,0063	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00994	0,009	0,00676	0,00429	0,0018	
	0,5	0,3	$\sigma(\Phi_2)$	0,02798	0,02594	0,02068	0,01418	0,00669
			$\sigma(\Phi_1)$	0,00972	0,00881	0,00664	0,00423	0,00179
0,5		$\sigma(\Phi_2)$	0,02369	0,02194	0,01745	0,01193	0,0056	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00972	0,00881	0,00664	0,00423	0,00179	
0,7		$\sigma(\Phi_2)$	0,02521	0,02337	0,0186	0,01273	0,00599	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00972	0,00881	0,00664	0,00423	0,00179	
0,9		$\sigma(\Phi_2)$	0,02673	0,02477	0,01973	0,01353	0,00638	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00972	0,00881	0,00664	0,00423	0,00179	
1,1		$\sigma(\Phi_2)$	0,02825	0,02619	0,02088	0,01432	0,00677	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00972	0,00881	0,00664	0,00423	0,00179	
			$\sigma(\Phi_2)$	0,02979	0,02763	0,02204	0,01514	0,00716

Таблица 4.14 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,02$) при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_b$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01607	0,01485	0,01171	0,0079	0,00363
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03215	0,02969	0,02341	0,0158	0,00726
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01785	0,0165	0,01305	0,00884	0,00409
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0357	0,03301	0,0261	0,01768	0,00817
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,01947	0,01801	0,01427	0,00969	0,0045
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03895	0,03603	0,02854	0,01939	0,009
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02103	0,01947	0,01544	0,01051	0,0049
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04206	0,03893	0,03089	0,02103	0,0098
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02256	0,02089	0,0166	0,01132	0,00529
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04513	0,04179	0,03319	0,02264	0,01058
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01813	0,01676	0,01326	0,00899	0,00416
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03625	0,03352	0,02651	0,01797	0,00832
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01978	0,0183	0,01451	0,00986	0,00458
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03957	0,03661	0,02901	0,01972	0,00917
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02134	0,01975	0,01568	0,01068	0,00498
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04268	0,03951	0,03135	0,02136	0,00996
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02286	0,02117	0,01682	0,01148	0,00537
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04573	0,04235	0,03365	0,02296	0,01074
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02438	0,02259	0,01796	0,01228	0,00576
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04876	0,04517	0,03593	0,02456	0,01152
0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02005	0,01855	0,01471	0,01	0,00465

0,4	0,5	$\sigma(\Phi_2)$	0,0401	0,0371	0,02941	0,02001	0,00931	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02163	0,02003	0,0159	0,01084	0,00506	
	0,7	$\sigma(\Phi_2)$	0,04327	0,04006	0,0318	0,02168	0,01012	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02315	0,02145	0,01705	0,01164	0,00545	
	0,9	$\sigma(\Phi_2)$	0,04631	0,04289	0,03409	0,02328	0,0109	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02467	0,02285	0,01818	0,01243	0,00584	
	1,1	$\sigma(\Phi_2)$	0,04933	0,0457	0,03636	0,02487	0,01168	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02618	0,02426	0,01932	0,01323	0,00623	
	0,4	0,3	$\sigma(\Phi_2)$	0,05236	0,04853	0,03864	0,02646	0,01245
			$\sigma(\Phi_1)$	0,02189	0,02027	0,0161	0,01098	0,00513
0,5		$\sigma(\Phi_2)$	0,04378	0,04054	0,03219	0,02195	0,01026	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02344	0,02171	0,01726	0,01179	0,00553	
0,7		$\sigma(\Phi_2)$	0,04687	0,04342	0,03452	0,02358	0,01106	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02494	0,02311	0,01839	0,01258	0,00591	
0,9		$\sigma(\Phi_2)$	0,04989	0,04623	0,03679	0,02517	0,01183	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02646	0,02452	0,01953	0,01338	0,0063	
1,1		$\sigma(\Phi_2)$	0,05291	0,04904	0,03906	0,02676	0,0126	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02798	0,02594	0,02068	0,01418	0,00669	
0,5	0,3	$\sigma(\Phi_2)$	0,05597	0,05188	0,04135	0,02836	0,01339	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02369	0,02194	0,01745	0,01193	0,0056	
	0,5	$\sigma(\Phi_2)$	0,04738	0,04389	0,0349	0,02385	0,01119	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02521	0,02337	0,0186	0,01273	0,00599	
	0,7	$\sigma(\Phi_2)$	0,05043	0,04673	0,0372	0,02546	0,01198	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02673	0,02477	0,01973	0,01353	0,00638	
	0,9	$\sigma(\Phi_2)$	0,05345	0,04954	0,03947	0,02705	0,01275	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02825	0,02619	0,02088	0,01432	0,00677	
	1,1	$\sigma(\Phi_2)$	0,05649	0,05238	0,04176	0,02865	0,01353	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02979	0,02763	0,02204	0,01514	0,00716	
0,5	0,3	$\sigma(\Phi_2)$	0,05958	0,05525	0,04408	0,03027	0,01433	
		$\sigma(\Phi_1)$	0,02979	0,02763	0,02204	0,01514	0,00716	

Таблица 4.15 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,03$) при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_f$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04822	0,04454	0,03512	0,0237	0,01089
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05355	0,04951	0,03915	0,02652	0,01226
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05842	0,05404	0,04281	0,02908	0,0135
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0631	0,0584	0,04633	0,03154	0,0147
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06769	0,06268	0,04979	0,03396	0,01587
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05438	0,05028	0,03977	0,02696	0,01248
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05935	0,05491	0,04352	0,02959	0,01375
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06402	0,05926	0,04703	0,03204	0,01495
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06859	0,06352	0,05047	0,03444	0,01612
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574

		$\sigma(\Phi_2)$	0,07314	0,06776	0,05389	0,03684	0,01728
0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06014	0,05565	0,04412	0,03001	0,01396
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0649	0,06008	0,0477	0,03252	0,01518
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06946	0,06434	0,05114	0,03492	0,01635
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,074	0,06856	0,05454	0,0373	0,01752
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07855	0,07279	0,05796	0,03969	0,01868
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06567	0,0608	0,04829	0,03293	0,01539
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07031	0,06512	0,05178	0,03537	0,01658
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07483	0,06934	0,05518	0,03775	0,01774
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07937	0,07356	0,05859	0,04014	0,01891
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08395	0,07783	0,06203	0,04254	0,02008
0,5	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07106	0,06583	0,05235	0,03578	0,01679
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07564	0,0701	0,0558	0,03819	0,01796
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08018	0,07432	0,0592	0,04058	0,01913
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08474	0,07857	0,06264	0,04297	0,0203
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08937	0,08288	0,06611	0,04541	0,02149

В таблицах 4.16–4.20 приведены, полученные в результате моделирования, значения максимальных относительных погрешностей $(\delta_Z)_{\max}$ (%) для тестовых объектов контроля с ЭАН $Z=7$, массовые толщины $(\rho H)_t$ изменяются от 1 до 20 г/см², при изменении параметров H_1 и H_f при $\sigma_0=0,001; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03$.

Таблица 4.16 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,001$) при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	2,18	2,06	2,18	2,34	2,52
0,2	2,04	2,07	2,2	2,38	2,53
0,3	2,09	2,086	2,23	2,45	2,64
0,4	2,07	2,12	2,299	2,49	2,73
0,5	2,097	2,16	2,33	2,57	2,73

Таблица 4.17 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,003$) при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	5,82	5,77	6,54	6,35	6,86
0,2	5,78	5,72	6,06	6,49	7,19
0,3	5,8	5,84	6,45	6,87	7,56
0,4	5,84	7,58	6,48	7,32	8,03
0,5	5,86	6,33	6,89	7,74	8,47

Таблица 4.18 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,01$) при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	19,45	18,87	20,66	23,14	26,01
0,2	18,68	19,01	20,1	24,78	27,8
0,3	19,11	24,79	24,02	26,66	28,59
0,4	22,92	23,86	24,52	27,86	30,72
0,5	24,07	24,57	26,24	29,71	32,43

Таблица 4.19 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,02$) при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	52,2	48,9	49,6	47,2	53,3
0,2	41,7	42,8	46,9	54,8	61,3
0,3	45,7	48,7	56,8	58,1	62,2
0,4	51,9	57,4	58,8	64,8	69,9
0,5	56,9	63,6	67,1	70,5	75,4

Таблица 4.20 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,03$) при изменении параметров H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	96,9	91,2	90,7	88,6	86,2
0,2	73,8	74,4	77,2	84,3	89,6
0,3	73,9	79,1	88	91,1	94,2
0,4	83,9	90,3	94	99,2	103,9
0,5	91,5	96,4	100,7	103,7	109,6

На рисунках 4.7–4.11 для наглядности представлены графики максимальных относительных погрешностей $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля с эффективным атомным номером $Z=7$ при изменении параметров H_1 и H_f при $\sigma_0=0,001$; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03.

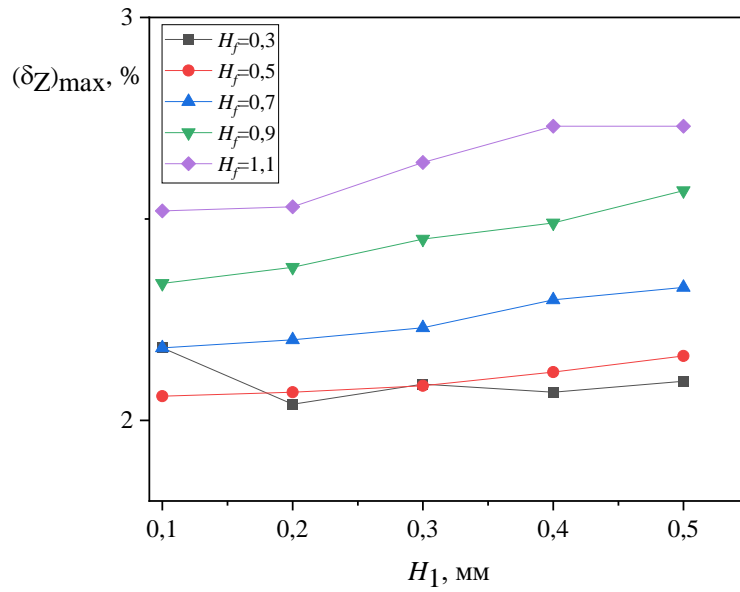


Рисунок 4.7 – Максимальные относительные погрешности $(\delta Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,001$) при изменении параметров H_1 и H_f

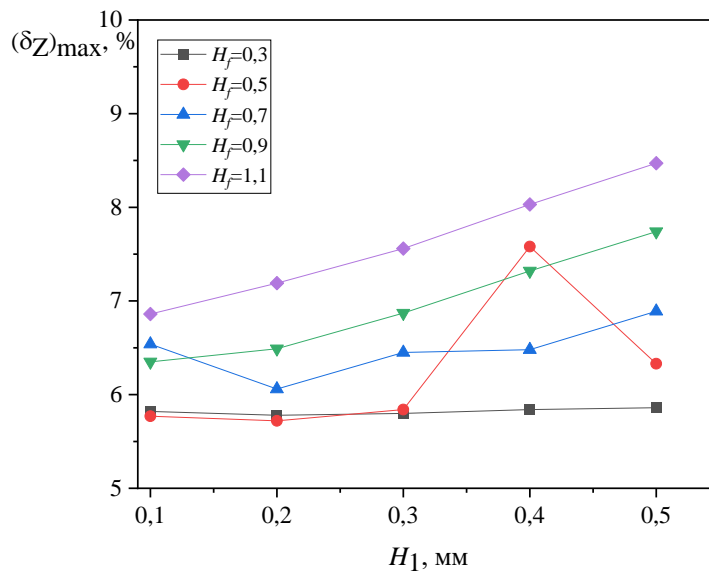


Рисунок 4.8 – Максимальные относительные погрешности $(\delta Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,003$) при изменении параметров H_1 и H_f

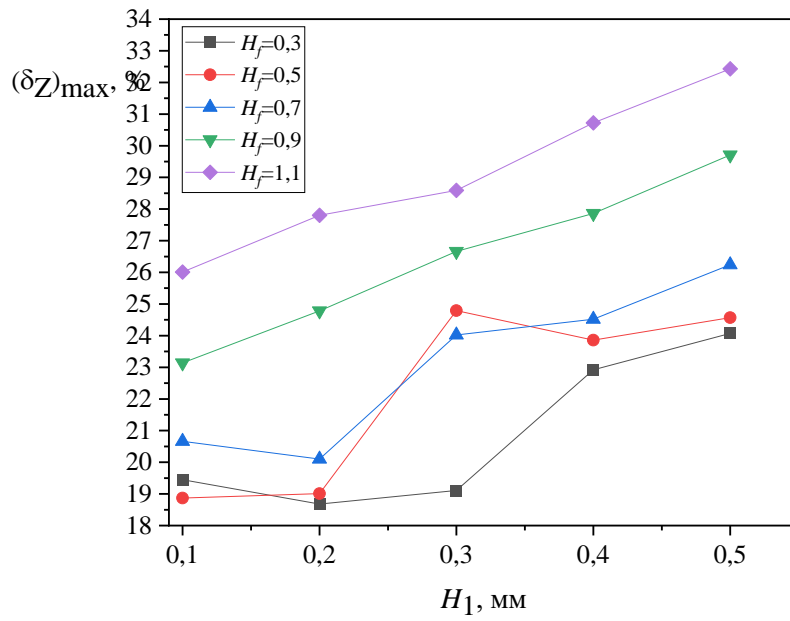


Рисунок 4.9 – Максимальные относительные погрешности $(\delta Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0.01$) при изменении параметров H_1 и H_f

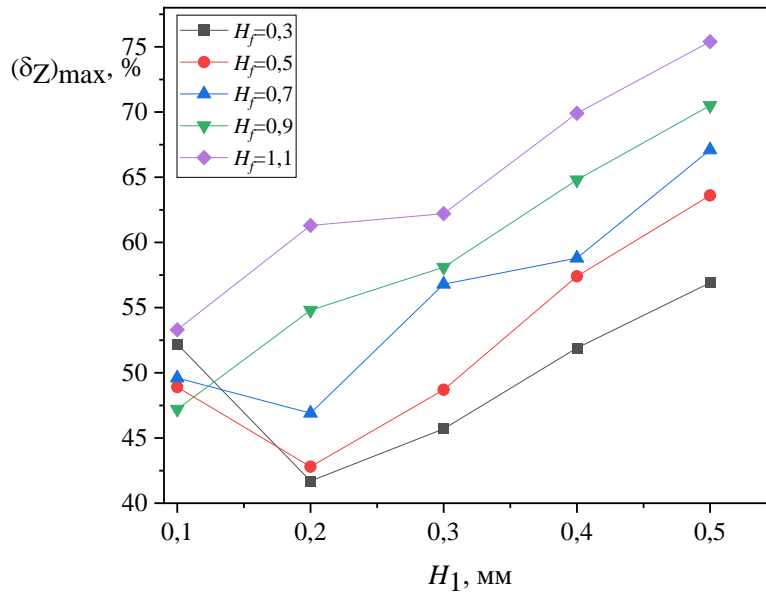


Рисунок 4.10 – Максимальные относительные погрешности $(\delta Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0.02$) при изменении параметров H_1 и H_f

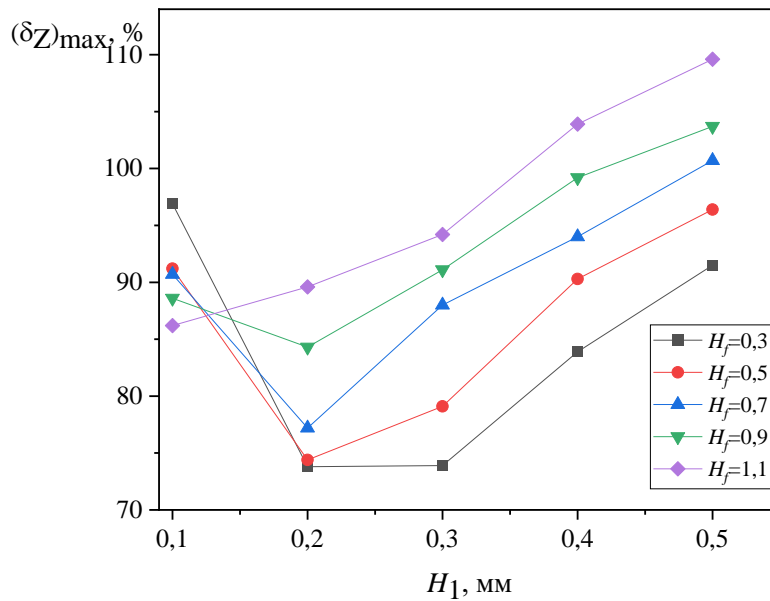


Рисунок 4.11 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,03$) при изменении параметров H_1 и H_f

В качестве критерия оптимальности сэндвич-детекторов излучения будем использовать минимум максимальной относительной погрешности оценки атомного номера исследуемых тестовых ОК (для рассматриваемого диапазона массовых толщин). Таким образом, согласно данному критерию, оптимальными будут считаться такие пары значений параметров H_1 и H_f для которых погрешность $(\delta_Z)_{\max}$ является минимальной. Заметим, что здесь мы учитываем тот факт, что в пределах настоящего параграфа значение еще одного параметра (параметра Z_1) задано – это ЭАН материала (CzI) первого детектора.

Из анализа данных, представленных в табл. 4.16 – 4.20 и на рис. 4.7 – 4.11, следует, что оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f зависят от значения параметра σ_0 , характеризующего уровни шумов радиационных прозрачностей ОК. Более того, даже при фиксированном значении параметра σ_0 находятся такие пары значений данных параметров, для которых соответствующая им погрешность $(\delta_Z)_{\max}$ незначительно отличается от своего минимального значения.

Из сказанного выше следует, что выбор оптимальных пар значений параметров H_1 и H_f оказывается неоднозначным. В этой связи предлагается

поступить следующим образом, а именно – осуществить указанный выбор в два этапа, описание которых приведено ниже.

На первом этапе найдем все оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f для фиксированного значения параметра σ_0 и назовем их локально-оптимальными, а их множество обозначим через $A(\sigma_0)$. В результате выполнения данного этапа получим в итоге пять множеств $A(\sigma_0)$, где $\sigma_0 = 0,001; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03$. На втором этапе найдем собственно оптимальные (иными словами, глобально-оптимальные) пары значений параметров H_1 и H_f , каковыми будут считаться те из них, которые чаще других встречаются во всех пяти множествах $A(\sigma_0)$.

При выполнении первого этапа локально-оптимальными логично считать такие пары значений параметров H_1 и H_f , для которых соответствующая им погрешность $(\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0)$ не превышает своего минимального значения на несколько (на R) процентов, т.е. это такие пары, для которых выполняется следующее условие:

$$\min_{H_1, H_f} (\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0) \leq (\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0) \leq \left(1 + \frac{R}{100\%}\right) \min_{H_1, H_f} (\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0), \quad (4.1)$$

или, что равносильно, когда

$$(\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0) \in Q(\sigma_0), \quad (4.2)$$

где

$$Q(\sigma_0) = \left[\min_{H_1, H_f} (\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0), \left(1 + \frac{R}{100\%}\right) \min_{H_1, H_f} (\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0) \right]. \quad (4.3)$$

Множество $Q(\sigma_0)$, по своему содержанию, представляет собой R -процентный промежуток минимальных значений максимальной относительной погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ для фиксированного значения параметра σ_0 .

Дополнительным аргументом в пользу критерия локальной оптимальности (4.1) – (4.3) выступает и тот факт, что само значение погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ не является абсолютно точным, поскольку содержит в себе элемент случайности, обусловленный тем, что погрешность рассчитывается по смоделированным

значениям шумов радиационных прозрачностей ОК, которые являются случайными величинами.

Для количественной оценки величины R был проведен полный цикл повторного моделирования (в количестве 10 раз) для некоторых значений параметров H_1 и H_f . Из полученных при этом результатов следует, что разброс между значениями погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ не превысил 5 % для всех рассматриваемых значений параметра σ_0 . Добавим к этому, что в математической статистике при проверке статистических гипотез чаще всего используется 5%-ный уровень значимости, как некой меры точности проверки гипотез. Исходя из этого, положим $R = 5\%$ и, соответственно, будем использовать в дальнейшем 5%-ные промежутки минимальных значений максимальной относительной погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, т.е. согласно (4.3) будем использовать множества вида:

$$Q(\sigma_0) = [\min_{H_1, H_f} (\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0); 1,05 \min_{H_1, H_f} (\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0)]. \quad (4.4)$$

В таблице 4.21 по данным из таблиц 4.16 – 4.20 приведены промежутки (4.4) для разных значений параметра σ_0 .

Таблица 4.21 – 5%-ные промежутки минимальных значений максимальной относительной погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ при использовании РЧЭ первых детекторов из иодида цезия для разных значений параметра σ_0

σ_0	0,001	0,003	0,01	0,02	0,03
$Q(\sigma_0)$	[2,04; 2,14]	[5,72; 6,01]	[18,68; 19,61]	[41,7; 43,79]	[73,8; 77,49]

В таблицах 4.22 – 4.26, с учетом таблиц 4.16 – 4.21, приведены локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f , т.е. приведены элементы множеств

$$A(\sigma_0) = \{(H_1, H_f) | (\delta_Z)_{\max}(H_1, H_f, \sigma_0) \in Q(\sigma_0)\}.$$

для разных значений параметра σ_0 . Прочерки в данных таблицах означают отсутствие соответствующих значений.

Таблица 4.22 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из иодида цезия для $\sigma_0 = 0,001$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	0,5	0,3; 0,5	0,3; 0,5	0,3; 0,5	0,3

Таблица 4.23 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из иодида цезия для $\sigma_0 = 0,003$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	0,3; 0,5	0,3; 0,5	0,3; 0,5	0,3	0,3

Таблица 4.24 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из иодида цезия для $\sigma_0 = 0,01$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	0,3; 0,5	0,3; 0,5	0,3	–	–

Таблица 4.25 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из иодида цезия для $\sigma_0 = 0,02$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	–	0,3; 0,5	–	–	–

Таблица 4.26 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из иодида цезия для $\sigma_0 = 0,03$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	–	0,3; 0,5; 0,7	0,3	–	–

Из таблиц 4.22 – 4.26 следует, что чаще всего (все 5 раз) в них встречаются следующие две пары значений параметров H_1 и H_f , которые и будут являться оптимальными, а именно:

$$H_{1\text{opt}} = 0,2 \text{ мм}, H_{f\text{opt}} = 0,3 \text{ мм}; H_{1\text{opt}} = 0,2 \text{ мм}, H_{f\text{opt}} = 0,5 \text{ мм}.$$

Принимая во внимание экономический фактор (минимизация затрат материалов на изготовление сэндвич-детекторов), предпочтение следует отдать паре:

$$H_{1\text{opt}} = 0,2 \text{ мм}, H_{f\text{opt}} = 0,3 \text{ мм}. \quad (4.5)$$

Предложенный алгоритм позволил получить значения параметров сэндвич-детекторов излучения (формула (4.5)), которые являются оптимальными при распознавании материалов с ЭАН равным 7 для случая, когда материалом РЧЭ первых детекторов является иодид цезия (CsI).

В [76] для проведения исследований с использованием метода дуальных энергий при $E_0=160$ кэВ применялся сэндвич-детектор со следующей структурой: первый детектор с РЧЭ из иодида цезия толщиной 0,3 мм – промежуточный фильтр из меди толщиной 0,7 мм – второй детектор с РЧЭ из иодида цезия толщиной 5 мм. Применительно к рассматриваемой нами модели сэндвич-детектора это соответствует случаю, когда $H_1 = 0,3$ мм, $H_f = 0,7$ мм.

Из таблиц 4.16 – 4.20 следует, что превышение погрешности $(\delta_Z)_{\text{max}}$ для пары значений $H_1 = 0,3$ мм, $H_f = 0,7$ мм по сравнению с парой значений (4.5) имеет место для всех значений параметра σ_0 и при этом варьируется в пределах от 9,3 % (когда $\sigma_0 = 0,001$) до 36,2 % ($\sigma_0 = 0,02$).

Отличие пары значений $H_1 = 0,3$ мм, $H_f = 0,7$ мм, используемой в [76], от полученной нами оптимальной пары значений (4.5) может быть обусловлено, в частности, тем, что в [76] в качестве тестовых материалов использовались оргстекло и алюминий, а в настоящей работе – материалы с ЭАН равным 7.

Судя по многочисленным публикациям, в частности [11,76,85,88,105], основными материалами, используемыми для изготовления РЧЭ первых детекторов в сэндвич-детекторах рентгеновского излучения, являются иодид цезия (CsI), оксисульфид гадолиния ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$) (также называемый сульфоксилатом гадолиния (GOS)), и селенид цинка (ZnSe). Исходя из этого, используем теперь предложенный нами алгоритм [106] для выбора параметров сэндвич-детекторов излучения, которые являются оптимальными при распознавании материалов с

ЭАН равным 7 для случая, когда материалом РЧЭ первых детекторов является оксисульфид гадолиния или селенид цинка.

4.3. Оптимизация параметров сэндвич-детекторов излучения при использовании радиационно-чувствительных элементов первых детекторов из оксисульфида гадолиния

В настоящем параграфе, на основе предложенного нами алгоритма, представлены результаты исследований, направленных на оптимизацию параметров H_1 и H_f сэндвич-детекторов излучения для случая, когда материалом первых детекторов является оксисульфид гадолиния, а материал тестовых ОК имеет эффективный атомный номер $Z=7$.

При проведении исследований максимальная энергия излучения, сам спектр рентгеновского излучения, множества значений параметров H_1 , H_f и σ_0 считались точно такими же, как и в параграфе 4.2.

В таблице 4.27 представлены результаты вычислений прозрачностей d_{\max} для всех 25 различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f , описанных на этапе 3 в параграфе 4.2.

Таблица 4.27 – Максимальные теоретические прозрачности для второго (заднего) детектора для различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f

H_f , мм	H_1 , мм				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,9474	0,9533	0,9583	0,9625	0,966
0,5	0,9573	0,9618	0,9655	0,9685	0,9708
0,7	0,9629	0,9666	0,9695	0,9719	0,9738
0,9	0,9664	0,9695	0,9719	0,9739	0,9754
1,1	0,9688	0,9714	0,9734	0,9745	0,9765

Верхняя $(\rho H)_+(Z)$ и нижняя $(\rho H)_-(Z)$ границы «минимального множества допустимых решений» $D_0(Z_1)$ для целочисленных значений Z представлены в таблице 4.28 и для наглядности на рисунке 4.12, учитывая, что $3 \leq Z \leq 30$:

$$(\rho H)_+(Z) = \min_{H_1} \{(\rho H)_{\max}(Z) | H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}\};$$

$$(\rho H)_-(Z) = \max_{H_1, H_f} \left\{ (\rho H)_{\min}(Z) \mid H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}; H_f = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1 \text{ мм} \right\}.$$

Таблица 4.28 – Нижняя $(\rho H)_-(Z)$ и верхняя $(\rho H)_+(Z)$ границы $D_0(Z_1)$

Z	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,402	0,388	0,368	0,334	0,325	0,313	0,314	0,283	0,275
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	73,89	70,72	66,48	60,02	58,40	56,69	57,99	53,62	53,69
Z	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,247	0,232	0,205	0,191	0,168	0,157	0,15	0,125	0,11
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	50,22	49,52	45,97	45,44	42,22	41,99	42,62	37,65	34,87
Z	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,105	0,096	0,088	0,078	0,071	0,063	0,059	0,052	0,051
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	35,36	34,12	32,85	30,39	29,11	26,84	25,71	23,21	22,89

Используя линейную интерполяцию, определим верхнюю и нижнюю границы «минимального множества допустимых решений» для нецелочисленных значений Z .

Строим и запоминаем в дискретизированной форме полноформатное «минимальное множество допустимых решений» $D_0(Z_1)$. При этом дискретизация по Z и по ρH происходит соответственно с шагом 0,1 и 0,1 г/см².

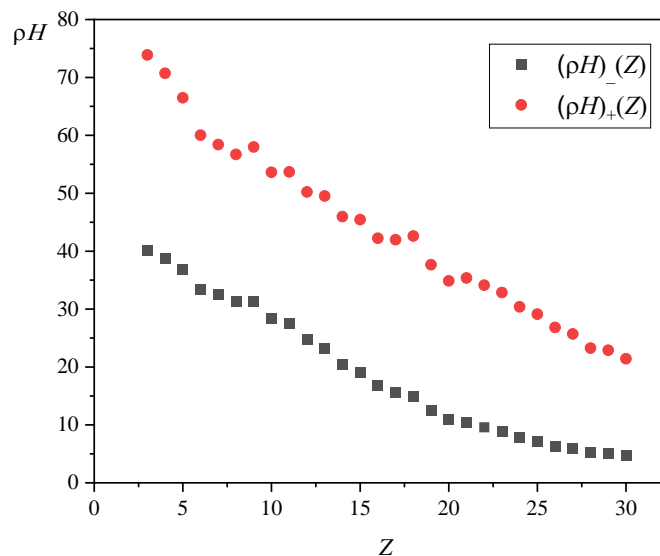


Рисунок 4.12 – Нижняя $(\rho H)_-(Z)$ и верхняя $(\rho H)_+(Z)$ границы $D_0(Z_1)$

В таблицах 4.29 – 4.33 приведены результаты расчетов СКО шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля из материала с ЭАН $Z=7$ при изменении H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0,001; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03$.

Таблица 4.29 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,001$) при изменении H_1 и H_f

$H_1, \text{ мм}$	$H_f, \text{ мм}$	СКО	$(\rho H)_b, \text{ г/см}^2$					
			1	2	5	10	20	
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00127	0,00115	0,00086	0,00055	0,00023	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0017	0,00157	0,00124	0,00084	0,00038	
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00127	0,00115	0,00086	0,00055	0,00023	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00191	0,00177	0,0014	0,00095	0,00044	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00127	0,00115	0,00086	0,00055	0,00023	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00209	0,00194	0,00154	0,00104	0,00049	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00127	0,00115	0,00086	0,00055	0,00023	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00226	0,0021	0,00166	0,00114	0,00053	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00127	0,00115	0,00086	0,00055	0,00023	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00243	0,00225	0,00179	0,00122	0,00057	
	0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00108	0,00098	0,00074	0,00047	0,0002
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00204	0,00188	0,00149	0,00101	0,00047
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,00108	0,00098	0,00074	0,00047	0,0002	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00226	0,00209	0,00166	0,00113	0,00053	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,00108	0,00098	0,00074	0,00047	0,0002	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00245	0,00227	0,0018	0,00123	0,00058	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,00108	0,00098	0,00074	0,00047	0,0002	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00263	0,00243	0,00194	0,00133	0,00062	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,00108	0,00098	0,00074	0,00047	0,0002	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00279	0,00259	0,00206	0,00142	0,00067	
0,3		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00101	0,00091	0,00069	0,00045	0,00019
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00239	0,00222	0,00176	0,0012	0,00056
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00101	0,00091	0,00069	0,00045	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00262	0,00243	0,00193	0,00132	0,00062	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00101	0,00091	0,00069	0,00045	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00282	0,00261	0,00208	0,00143	0,00067	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00101	0,00091	0,00069	0,00045	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,003	0,00278	0,00222	0,00152	0,00072	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00101	0,00091	0,00069	0,00045	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00317	0,00294	0,00235	0,00161	0,00077	
	0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00067	0,00043	0,00019
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00276	0,00256	0,00204	0,0014	0,00066
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00067	0,00043	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,003	0,00278	0,00221	0,00152	0,00072	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00067	0,00043	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0032	0,00297	0,00237	0,00163	0,00077	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00067	0,00043	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00338	0,00314	0,00251	0,00173	0,00082	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,00097	0,00088	0,00067	0,00043	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00356	0,0033	0,00264	0,00182	0,00087	
0,5		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00095	0,00087	0,00066	0,00043	0,00018
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00315	0,00292	0,00233	0,0016	0,00076
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00095	0,00087	0,00066	0,00043	0,00018	

	0,7	$\sigma(\Phi_2)$	0,00338	0,00314	0,00251	0,00172	0,00082
		$\sigma(\Phi_1)$	0,00095	0,00087	0,00066	0,00043	0,00018
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00359	0,00333	0,00266	0,00183	0,00087
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00095	0,00087	0,00066	0,00043	0,00018
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00378	0,00351	0,00281	0,00194	0,00092
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00095	0,00087	0,00066	0,00043	0,00018
$\sigma(\Phi_2)$		0,00396	0,00368	0,00295	0,00203	0,00097	

Таблица 4.30 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,003$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_r$, г/см ²					
			1	2	5	10	20	
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0.00381	0.00344	0.00258	0.00164	0.00069	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.0051	0.00471	0.00371	0.00251	0.00115	
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0.00381	0.00344	0.00258	0.00164	0.00069	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00573	0.0053	0.00419	0.00284	0.00132	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0.00381	0.00344	0.00258	0.00164	0.00069	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00628	0.00581	0.00461	0.00313	0.00146	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0.00381	0.00344	0.00258	0.00164	0.00069	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00679	0.00629	0.00499	0.00341	0.00159	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0.00381	0.00344	0.00258	0.00164	0.00069	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00728	0.00675	0.00536	0.00367	0.00172	
	0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0.00324	0.00293	0.00222	0.00142	0.0006
			$\sigma(\Phi_2)$	0.00612	0.00565	0.00448	0.00304	0.00141
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0.00324	0.00293	0.00222	0.00142	0.0006	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00678	0.00627	0.00498	0.00339	0.00158	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0.00324	0.00293	0.00222	0.00142	0.0006	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00735	0.00681	0.00541	0.0037	0.00173	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0.00324	0.00293	0.00222	0.00142	0.0006	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00788	0.0073	0.00581	0.00398	0.00187	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0.00324	0.00293	0.00222	0.00142	0.0006	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00838	0.00777	0.00619	0.00425	0.002	
0,3		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0.00302	0.00274	0.00208	0.00134	0.00057
			$\sigma(\Phi_2)$	0.00718	0.00665	0.00528	0.0036	0.00169
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0.00302	0.00274	0.00208	0.00134	0.00057	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00786	0.00729	0.0058	0.00396	0.00187	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0.00302	0.00274	0.00208	0.00134	0.00057	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00845	0.00784	0.00624	0.00428	0.00202	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0.00302	0.00274	0.00208	0.00134	0.00057	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.009	0.00834	0.00665	0.00457	0.00216	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0.00302	0.00274	0.00208	0.00134	0.00057	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00951	0.00882	0.00704	0.00484	0.0023	
	0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0.00291	0.00265	0.00202	0.0013	0.00056
			$\sigma(\Phi_2)$	0.00829	0.00768	0.00611	0.00419	0.00197
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0.00291	0.00265	0.00202	0.0013	0.00056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00899	0.00833	0.00664	0.00456	0.00216	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0.00291	0.00265	0.00202	0.0013	0.00056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.00959	0.0089	0.0071	0.00488	0.00232	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0.00291	0.00265	0.00202	0.0013	0.00056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.01015	0.00942	0.00752	0.00518	0.00246	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0.00291	0.00265	0.00202	0.0013	0.00056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0.01068	0.00991	0.00792	0.00546	0.0026	
0,5		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0.00285	0.0026	0.00198	0.00128	0.00055

	0,5	$\sigma(\Phi_2)$	0.00945	0.00876	0.00698	0.00479	0.00227
		$\sigma(\Phi_1)$	0.00285	0.0026	0.00198	0.00128	0.00055
	0,7	$\sigma(\Phi_2)$	0.01015	0.00941	0.00752	0.00517	0.00246
		$\sigma(\Phi_1)$	0.00285	0.0026	0.00198	0.00128	0.00055
	0,9	$\sigma(\Phi_2)$	0.01077	0.00999	0.00799	0.0055	0.00262
		$\sigma(\Phi_1)$	0.00285	0.0026	0.00198	0.00128	0.00055
	1,1	$\sigma(\Phi_2)$	0.01134	0.01053	0.00842	0.00581	0.00277
		$\sigma(\Phi_1)$	0.00285	0.0026	0.00198	0.00128	0.00055
		$\sigma(\Phi_2)$	0.01189	0.01104	0.00884	0.0061	0.00292

Таблица 4.31 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,01$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_b$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,0127	0,01147	0,0086	0,00547	0,00231
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01699	0,01569	0,01237	0,00835	0,00385
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,0127	0,01147	0,0086	0,00547	0,00231
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01909	0,01765	0,01397	0,00947	0,00439
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,0127	0,01147	0,0086	0,00547	0,00231
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02093	0,01937	0,01536	0,01045	0,00487
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,0127	0,01147	0,0086	0,00547	0,00231
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02264	0,02096	0,01665	0,01135	0,00531
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,0127	0,01147	0,0086	0,00547	0,00231
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02428	0,02249	0,01788	0,01222	0,00573
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01079	0,00978	0,00739	0,00473	0,00201
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02039	0,01885	0,01492	0,01013	0,00471
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01079	0,00978	0,00739	0,00473	0,00201
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02258	0,0209	0,01659	0,0113	0,00528
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,01079	0,00978	0,00739	0,00473	0,00201
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0245	0,02269	0,01804	0,01233	0,00578
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,01079	0,00978	0,00739	0,00473	0,00201
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02626	0,02434	0,01937	0,01326	0,00624
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,01079	0,00978	0,00739	0,00473	0,00201
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02795	0,02591	0,02064	0,01415	0,00668
0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01007	0,00915	0,00694	0,00446	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02395	0,02217	0,01759	0,012	0,00562
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01007	0,00915	0,00694	0,00446	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02621	0,02428	0,01932	0,01322	0,00622
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,01007	0,00915	0,00694	0,00446	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02818	0,02612	0,02081	0,01427	0,00673
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,01007	0,00915	0,00694	0,00446	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03	0,02782	0,02218	0,01523	0,00721
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,01007	0,00915	0,00694	0,00446	0,00191
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03172	0,02942	0,02348	0,01614	0,00765
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00971	0,00883	0,00672	0,00434	0,00187
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02765	0,02562	0,02038	0,01395	0,00658
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00971	0,00883	0,00672	0,00434	0,00187
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02996	0,02778	0,02214	0,0152	0,00719
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00971	0,00883	0,00672	0,00434	0,00187
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03197	0,02965	0,02367	0,01628	0,00772
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00971	0,00883	0,00672	0,00434	0,00187
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03384	0,0314	0,02508	0,01726	0,00821
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00971	0,00883	0,00672	0,00434	0,00187

		$\sigma(\Phi_2)$	0,0356	0,03303	0,0264	0,01819	0,00866
0,5	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00951	0,00866	0,0066	0,00427	0,00185
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03148	0,02919	0,02327	0,01598	0,00757
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00951	0,00866	0,0066	0,00427	0,00185
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03383	0,03138	0,02506	0,01724	0,0082
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00951	0,00866	0,0066	0,00427	0,00185
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03589	0,0333	0,02663	0,01835	0,00874
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00951	0,00866	0,0066	0,00427	0,00185
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0378	0,03509	0,02806	0,01936	0,00924
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00951	0,00866	0,0066	0,00427	0,00185
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03964	0,0368	0,02945	0,02033	0,00972

Таблица 4.32 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,02$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_f$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02539	0,02294	0,0172	0,01095	0,00462
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03399	0,03139	0,02475	0,01671	0,00769
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02539	0,02294	0,0172	0,01095	0,00462
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03818	0,03531	0,02793	0,01895	0,00878
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02539	0,02294	0,0172	0,01095	0,00462
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04187	0,03874	0,03072	0,0209	0,00973
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02539	0,02294	0,0172	0,01095	0,00462
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04528	0,04192	0,03329	0,02271	0,01061
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02539	0,02294	0,0172	0,01095	0,00462
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04856	0,04498	0,03576	0,02443	0,01146
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02157	0,01956	0,01478	0,00946	0,00403
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04077	0,0377	0,02983	0,02026	0,00941
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02157	0,01956	0,01478	0,00946	0,00403
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04517	0,04181	0,03318	0,02261	0,01057
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02157	0,01956	0,01478	0,00946	0,00403
		$\sigma(\Phi_2)$	0,049	0,04538	0,03608	0,02465	0,01157
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02157	0,01956	0,01478	0,00946	0,00403
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05253	0,04867	0,03874	0,02652	0,01248
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02157	0,01956	0,01478	0,00946	0,00403
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05589	0,05181	0,04128	0,0283	0,01335
0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02014	0,0183	0,01388	0,00893	0,00382
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04789	0,04433	0,03519	0,024	0,01124
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02014	0,0183	0,01388	0,00893	0,00382
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05242	0,04857	0,03864	0,02643	0,01244
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02014	0,0183	0,01388	0,00893	0,00382
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05636	0,05224	0,04162	0,02854	0,01347
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02014	0,0183	0,01388	0,00893	0,00382
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06	0,05563	0,04437	0,03046	0,01441
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02014	0,0183	0,01388	0,00893	0,00382
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06343	0,05883	0,04696	0,03228	0,01531
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01942	0,01767	0,01344	0,00868	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0553	0,05123	0,04077	0,02791	0,01316
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01942	0,01767	0,01344	0,00868	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05992	0,05555	0,04428	0,03039	0,01438
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,01942	0,01767	0,01344	0,00868	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06395	0,05931	0,04734	0,03255	0,01544

	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,01942	0,01767	0,01344	0,00868	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06768	0,06279	0,05016	0,03452	0,01641
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,01942	0,01767	0,01344	0,00868	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07119	0,06607	0,05281	0,03639	0,01733
0,5	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01902	0,01732	0,0132	0,00855	0,0037
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06297	0,05838	0,04655	0,03196	0,01515
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01902	0,01732	0,0132	0,00855	0,0037
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06765	0,06276	0,05011	0,03448	0,0164
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,01902	0,01732	0,0132	0,00855	0,0037
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07177	0,0666	0,05326	0,0367	0,01748
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,01902	0,01732	0,0132	0,00855	0,0037
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07561	0,07018	0,05612	0,03871	0,01848
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,01902	0,01732	0,0132	0,00855	0,0037
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07928	0,0736	0,05891	0,04067	0,01944

Таблица 4.33 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,03$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_b$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03809	0,03441	0,02581	0,01642	0,00693
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05098	0,04708	0,03712	0,02506	0,01154
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03809	0,03441	0,02581	0,01642	0,00693
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05728	0,05296	0,0419	0,02842	0,01317
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03809	0,03441	0,02581	0,01642	0,00693
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0628	0,05812	0,04608	0,03135	0,0146
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03809	0,03441	0,02581	0,01642	0,00693
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06792	0,06288	0,04994	0,03406	0,01592
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03809	0,03441	0,02581	0,01642	0,00693
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07284	0,06747	0,05364	0,03665	0,01719
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03236	0,02934	0,02217	0,01419	0,00604
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06116	0,05655	0,04475	0,03038	0,01412
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03236	0,02934	0,02217	0,01419	0,00604
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06775	0,06271	0,04977	0,03391	0,01585
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03236	0,02934	0,02217	0,01419	0,00604
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0735	0,06808	0,05412	0,03698	0,01735
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03236	0,02934	0,02217	0,01419	0,00604
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07879	0,07301	0,05811	0,03978	0,01872
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03236	0,02934	0,02217	0,01419	0,00604
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08384	0,07772	0,06192	0,04245	0,02003
0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03021	0,02744	0,02082	0,01339	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07184	0,0665	0,05278	0,036	0,01686
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03021	0,02744	0,02082	0,01339	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07864	0,07285	0,05795	0,03965	0,01866
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03021	0,02744	0,02082	0,01339	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08454	0,07836	0,06243	0,04281	0,0202
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03021	0,02744	0,02082	0,01339	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08999	0,08345	0,06655	0,04569	0,02162
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03021	0,02744	0,02082	0,01339	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,09515	0,08825	0,07044	0,04842	0,02296
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02913	0,0265	0,02016	0,01302	0,00561
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08295	0,07685	0,06115	0,04186	0,01974
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02913	0,0265	0,02016	0,01302	0,00561
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08988	0,08333	0,06643	0,04559	0,02158

	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02913	0,0265	0,02016	0,01302	0,00561
		$\sigma(\Phi_2)$	0,09592	0,08896	0,071	0,04883	0,02316
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02913	0,0265	0,02016	0,01302	0,00561
		$\sigma(\Phi_2)$	0,10152	0,09419	0,07524	0,05178	0,02462
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02913	0,0265	0,02016	0,01302	0,00561
		$\sigma(\Phi_2)$	0,10679	0,0991	0,07921	0,05458	0,02599
0,5	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02853	0,02598	0,01981	0,01282	0,00555
		$\sigma(\Phi_2)$	0,09445	0,08757	0,06982	0,04795	0,02272
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02853	0,02598	0,01981	0,01282	0,00555
		$\sigma(\Phi_2)$	0,10148	0,09413	0,07517	0,05173	0,0246
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02853	0,02598	0,01981	0,01282	0,00555
		$\sigma(\Phi_2)$	0,10766	0,0999	0,07989	0,05504	0,02622
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02853	0,02598	0,01981	0,01282	0,00555
		$\sigma(\Phi_2)$	0,11341	0,10527	0,08418	0,05807	0,02772
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02853	0,02598	0,01981	0,01282	0,00555
		$\sigma(\Phi_2)$	0,11892	0,1104	0,08836	0,061	0,02916

В таблицах 4.34–4.38 приведены значения максимальных относительных погрешностей $(\delta_Z)_{\max}$ (%) для тестовых объектов контроля с ЭАН $Z=7$, массовые толщины $(\rho H)_t$ изменяются от 1 до 20 г/см² при изменении параметров H_1 и H_f при $\sigma_0=0,001; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03$.

Таблица 4.34 – Максимальные относительные погрешности для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,001$) при изменении H_1 и H_f

$H_1, \text{ мм}$	$H_f, \text{ мм}$				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	3,34	3,16	3,03	3,05	3,08
0,2	3,2	3,09	3,04	3,04	3,15
0,3	3,32	3,27	3,25	3,29	3,41
0,4	3,53	3,49	3,55	3,59	3,67
0,5	3,85	3,76	3,88	3,93	4,45

Таблица 4.35 – Максимальные относительные погрешности для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,003$) при изменении H_1 и H_f

$H_1, \text{ мм}$	$H_f, \text{ мм}$				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	8,84	8,32	8,16	8,21	8,28
0,2	8,51	8,23	8,2	8,37	8,52
0,3	8,89	8,75	8,78	9,06	9,24
0,4	9,7	9,42	9,79	10,26	10,86
0,5	10,44	10,98	11,49	12,11	12,52

Таблица 4.36 – Максимальные относительные погрешности для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,01$) при изменении H_1 и H_f

$H_1, \text{ мм}$	$H_f, \text{ мм}$				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	29,04	27,64	27,26	26,98	27,33
0,2	28,1	27,38	27,62	27,71	28,77

0,3	29,51	30,12	31,37	33,6	35,48
0,4	33,79	35,97	37,72	38,9	41,7
0,5	39,76	41,64	43,42	45,2	48,61

Таблица 4.37 – Максимальные относительные погрешности для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,02$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	63,84	59,32	58,99	55,17	55,49
0,2	54,49	54,35	59,82	62,19	65,99
0,3	63,29	68,44	72,28	76,57	81,79
0,4	75,62	81,17	86,39	89,67	92,98
0,5	86,93	92,75	97,67	99,69	103,64

Таблица 4.38 – Максимальные относительные погрешности для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,03$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	102,31	99,65	98,5	95,02	94,6
0,2	85,71	84,31	92,96	96,28	101,8
0,3	94,76	99,47	107,5	110,6	115,7
0,4	107,68	112,86	116,38	123,3	125,6
0,5	118,3	123,1	128,12	131,63	133,7

На рисунках 4.13–4.17 для наглядности представлены графики максимальных относительных погрешностей $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых ОК с эффективным атомным номером $Z=7$ для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0=0,001; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03$.

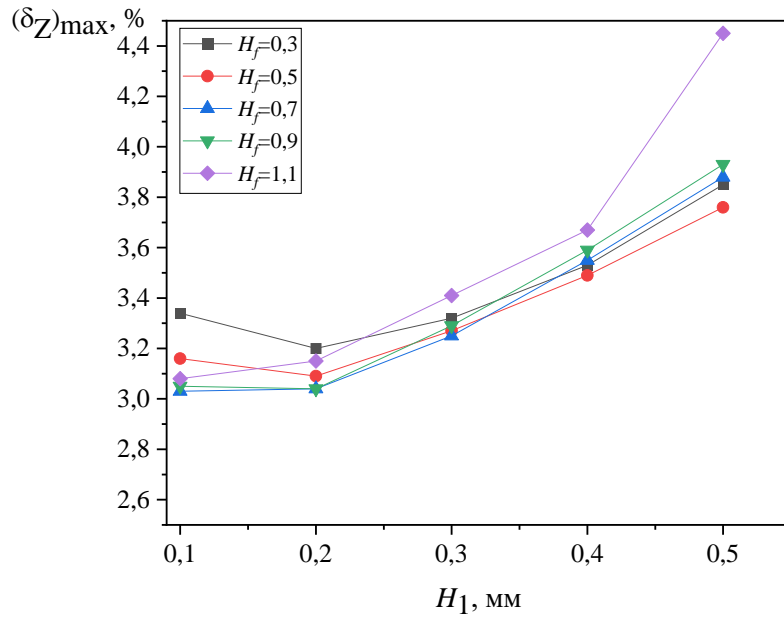


Рисунок 4.13 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0.001$)

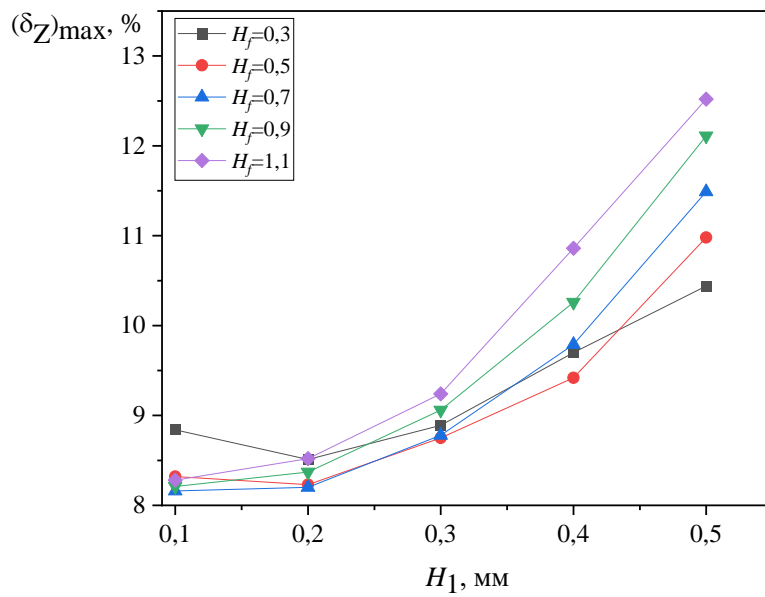


Рисунок 4.14 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0.003$)

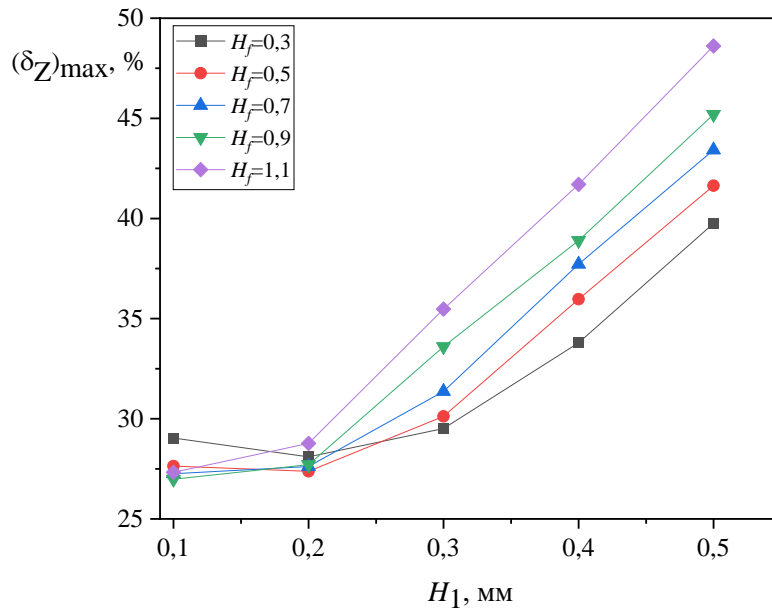


Рисунок 4.15 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля с ЭАН ($Z=7, \sigma_0=0.01$)

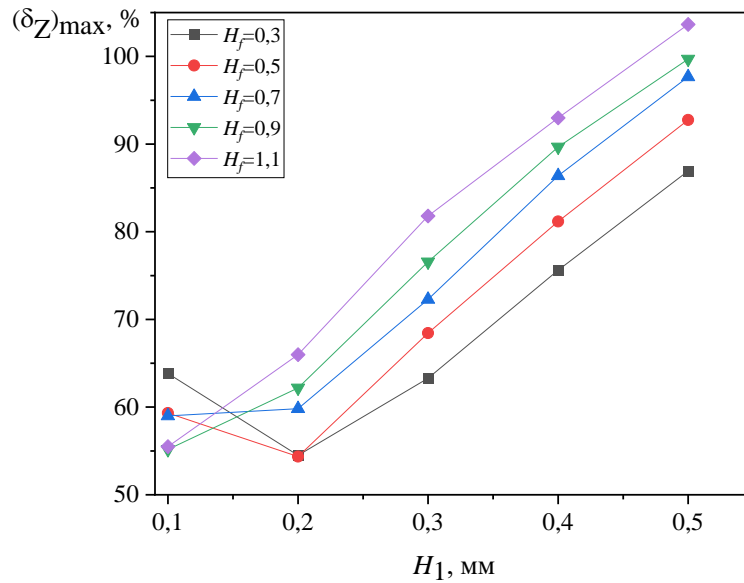


Рисунок 4.16 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0.02$)

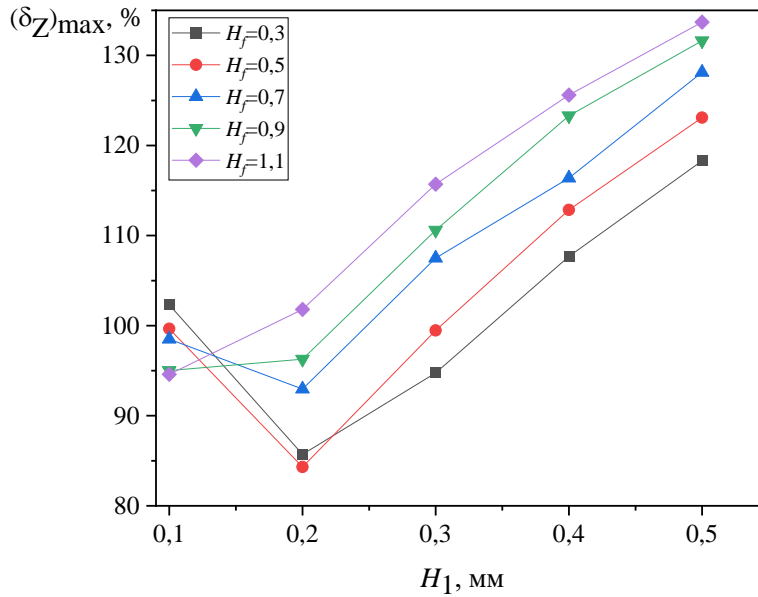


Рисунок 4.17 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,03$)

В таблице 4.39 по данным из табл. 4.34–4.38 в соответствии с формулой (4.4) приведены 5%-ные промежутки $Q(\sigma_0)$ минимальных значений максимальной относительной погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ при использовании РЧЭ первых детекторов из оксисульфида гадолиния для разных значений параметра σ_0 .

Таблица 4.39 – 5%-ные промежутки минимальных значений максимальной относительной погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ при использовании РЧЭ первых детекторов из оксисульфида гадолиния для разных значений параметра σ_0

σ_0	0,001	0,003	0,01	0,02	0,03
$Q(\sigma_0)$	[3,03; 3,18]	[8,16; 8,57]	[26,98; 28,33]	[54,35; 57,07]	[84,31; 88,53]

В таблицах 4.40 – 4.44, с учетом таблиц 4.34 – 4.38, приведены локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из оксисульфида гадолиния. Прочерки в данных таблицах означают отсутствие соответствующих значений.

Таблица 4.40 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из оксисульфида гадолиния для $\sigma_0 = 0,001$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	0,5;0,7; 0,9;1,1	0,5;0,7; 0,9;1,1	–	–	–

Таблица 4.41 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из оксисульфида гадолиния для $\sigma_0 = 0,003$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	0,5; 0,7; 0,9; 1,1	0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1	–	–	–

Таблица 4.42 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из оксисульфида гадолиния для $\sigma_0 = 0,01$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	0,5; 0,7; 0,9; 1,1	0,3; 0,5; 0,7; 0,9	-	-	-

Таблица 4.43 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из оксисульфида гадолиния для $\sigma_0 = 0,02$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	0,9; 1,1	0,3; 0,5	-	-	-

Таблица 4.44 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из оксисульфида гадолиния для $\sigma_0 = 0,03$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	-	0,3; 0,5	-	-	-

Как следует из таблиц 4.40 – 4.44 чаще всего (все 5 раз) в них встречаются следующая пара значений параметров H_1 и H_f , которая и будет являться оптимальной, а именно:

$$H_{1\text{opt}} = 0,2 \text{ мм}, H_{f\text{opt}} = 0,5 \text{ мм}. \quad (4.6)$$

Были получены значения параметров сэндвич-детекторов излучения (формула (4.6)), которые являются оптимальными при распознавании материалов с ЭАН равным 7 для случая, когда материалом РЧЭ первых детекторов является оксисульфид гадолиния (Gd_2O_2S).

В [76] при проведении исследований с использованием метода дуальных энергий применялись различные сэндвич-детекторы, в числе которых были и такие, где материалом первых детекторов являлся оксисульфид гадолиния.

При этом в [76] были получены следующие оптимальные значения параметров H_1 и H_f для $E_0 = 160$ кэВ:

$$H_1 = 0,2 \text{ мм}, H_f = 0,6 \text{ мм}. \quad (4.7)$$

Критерий оптимальности, использованный в [76], совпадает на содержательном (смысловом) уровне с используемым нами критерием – это максимум точности распознавания материалов по их атомному номеру. Однако количественные формы выражения данного критерия в настоящей работе и в [76] различны. А именно, в [76] – это максимум производной по атомному номеру от логарифма отношения высокоэнергетического отклика I_{HE} (соответствует второму (заднему) детектору) к низкоэнергетическому отклику I_{LE} (соответствует первому (переднему) детектору):

$$\frac{\partial}{\partial Z} \ln \left(\frac{I_{HE}}{I_{LE}} \right) \rightarrow \max . \quad (4.8)$$

В настоящей же работе – это минимум максимальной относительной погрешности оценки эффективного атомного номера материала с ЭАН равным 7 порождаемой квантовой природой рентгеновского излучения:

$$(\delta_Z)_{\max|Z=7} \rightarrow \min . \quad (4.9)$$

Для сравнения пар (4.6) и (4.7) между собой по значениям соответствующим им погрешностям $(\delta_Z)_{\max}$ нами было проведено дополнительное моделирование для пары (4.7). Результаты этого моделирования представлены в табл. 4.45.

Таблица 4.45 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых ОК ($Z=7$) при использовании РЧЭ первых детекторов из оксисульфида гадолиния с $H_1=0,2$ мм и $H_f=0,6$ мм для разных значений параметра σ_0

$(\delta_Z)_{\max}$, (%)	3,056	8,19	27,27	56,37	88,13
σ_0	0,001	0,003	0,01	0,02	0,03

Как следует из табл. 4.34 – 4.39 и табл. 4.45 значения погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ для пары (4.7) практически совпадают со значениями этой погрешности для пары (4.6) для всех рассматриваемых значений параметра σ_0 . Отсюда вытекает, что полученная в [76] оптимальная пара (4.7) равнозначна по величине погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ с полученной нами оптимальной парой (4.6) и, поэтому, пару (4.7) также следует считать оптимальной парой по используемому нами критерию (4.9). Между тем, если принять во внимание экономический фактор (минимизация затрат материалов на изготовление сэндвич-детекторов), то предпочтение следует отдать паре (4.6).

4.4. Оптимизация параметров сэндвич-детекторов излучения при использовании радиационно-чувствительных элементов первых детекторов из селенида цинка

В настоящем параграфе, на основе предложенного нами алгоритма, представлены результаты исследований, направленных на оптимизацию параметров H_1 и H_f сэндвич-детекторов излучения для случая, когда материалом РЧЭ первых детекторов является селенид цинка (ZnSe), а материал тестовых ОК имеет эффективный атомный номер $Z=7$. При проведении исследований максимальная энергия излучения, сам спектр рентгеновского излучения, множества значений параметров H_1 , H_f и σ_0 считались точно такими же, как и в параграфе 4.2.

В таблице 4.46 представлены результаты вычислений прозрачностей d_{\max} для всех 25 различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f , описанных на этапе 3 в параграфе 4.2.

Таблица 4.46 – Максимальные теоретические прозрачности для второго (заднего) детектора для различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f

H_f , мм	H_1 , мм				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,9457	0,9499	0,9565	0,961	0,9642
0,5	0,9552	0,9577	0,9617	0,9647	0,9669
0,7	0,9604	0,9622	0,965	0,9671	0,9687
0,9	0,9639	0,9652	0,9672	0,9688	0,9702
1,1	0,9664	0,9674	0,9689	0,9703	0,9714

Верхняя $(\rho H)_+(Z)$ и нижняя $(\rho H)_-(Z)$ границы «минимального множества допустимых решений» $D_0(Z_1)$ для целочисленных значений Z представлены в таблице 4.47 и для наглядности на рисунке 4.18, учитывая, что $3 \leq Z \leq 30$:

$$(\rho H)_+(Z) = \min_{H_1} \{(\rho H)_{\max}(Z) | H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}\};$$

$$(\rho H)_-(Z) = \max_{H_1, H_f} \{(\rho H)_{\min}(Z) | H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}; H_f = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1 \text{ мм}\}.$$

Таблица 4.47 – Нижняя $(\rho H)_-(Z)$ и верхняя $(\rho H)_+(Z)$ границы « $D_0(Z_1)$ »

Z	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,204	0,197	0,188	0,172	0,17	0,166	0,171	0,158	0,158
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	75,3	72,27	68,15	61,76	60,33	58,76	60,28	55,89	56,1
Z	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,146	0,142	0,13	0,126	0,114	0,11	0,109	0,093	0,083
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	52,61	51,99	48,37	47,92	44,62	44,46	45,23	40,03	37,14
Z	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,082	0,076	0,071	0,064	0,059	0,053	0,049	0,044	0,042
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	37,73	36,45	35,15	32,56	31,23	28,83	27,65	25,04	24,67

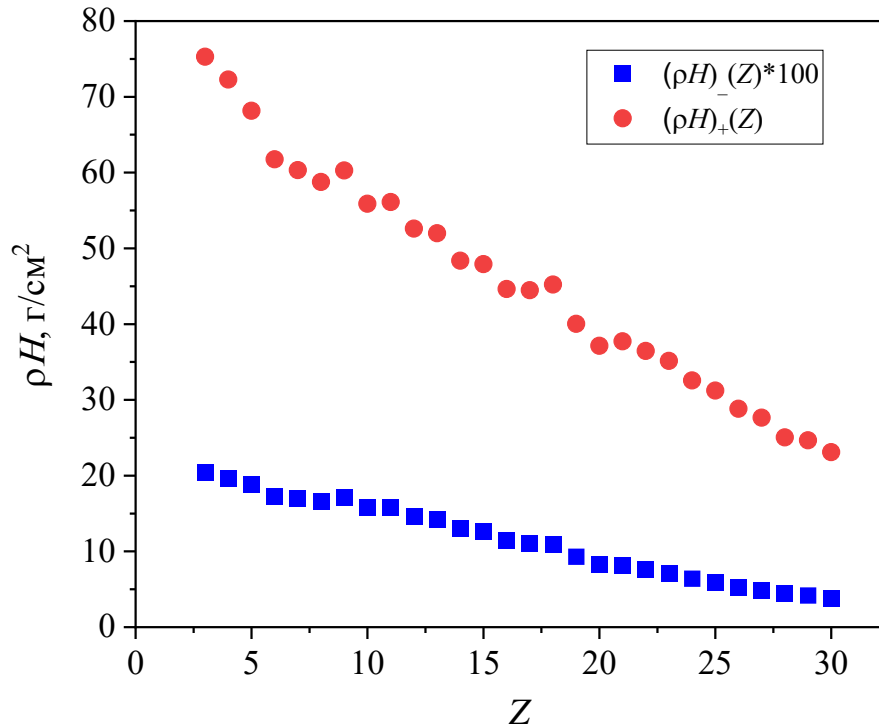


Рисунок 4.18 – Нижняя $(\rho H)_-(Z)$ и верхняя $(\rho H)_+(Z)$ границы $D_0(Z_1)$

Используя линейную интерполяцию, найдем верхнюю и нижнюю границы «минимального множества допустимых решений» для нецелочисленных значений Z .

Строим и запоминаем в дискретизированной форме полноформатное «минимальное множество допустимых решений» $D_0(Z_1)$. При этом дискретизация по Z и по ρH происходит с шагом 0,1 и 0,1 г/см², соответственно.

Результаты расчетов среднеквадратических отклонений шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля из материала с эффективным атомным номером $Z=7$ для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0,001; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03$ представлены в таблицах 4.48 – 4.52.

Таблица 4.48 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,001$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_p$, г/см ²					
			1	2	5	10	20	
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00142	0,00125	0,00088	0,00053	0,0002	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00146	0,00135	0,00106	0,00071	0,00033	
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00142	0,00125	0,00088	0,00053	0,0002	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00165	0,00152	0,0012	0,00081	0,00037	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00142	0,00125	0,00088	0,00053	0,0002	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00181	0,00168	0,00133	0,0009	0,00042	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00142	0,00125	0,00088	0,00053	0,0002	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00197	0,00183	0,00145	0,00098	0,00046	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00142	0,00125	0,00088	0,00053	0,0002	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00213	0,00197	0,00156	0,00107	0,0005	
	0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00123	0,00109	0,00078	0,00047	0,00019
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00153	0,00142	0,00112	0,00075	0,00034
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,00123	0,00109	0,00078	0,00047	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00171	0,00158	0,00125	0,00085	0,00039	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,00123	0,00109	0,00078	0,00047	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00188	0,00174	0,00137	0,00093	0,00043	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,00123	0,00109	0,00078	0,00047	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00203	0,00188	0,00149	0,00101	0,00047	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,00123	0,00109	0,00078	0,00047	0,00019	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00219	0,00203	0,00161	0,0011	0,00051	
0,3		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00115	0,00102	0,00074	0,00045	0,00018
			$\sigma(\Phi_2)$	0,0016	0,00148	0,00117	0,00079	0,00036
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00115	0,00102	0,00074	0,00045	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00178	0,00164	0,0013	0,00088	0,00041	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00115	0,00102	0,00074	0,00045	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00194	0,00179	0,00142	0,00096	0,00045	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00115	0,00102	0,00074	0,00045	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00209	0,00194	0,00154	0,00105	0,00049	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00115	0,00102	0,00074	0,00045	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00225	0,00208	0,00165	0,00113	0,00053	
	0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,0011	0,00098	0,00072	0,00044	0,00018
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00167	0,00154	0,00122	0,00082	0,00038
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,0011	0,00098	0,00072	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00184	0,0017	0,00134	0,00091	0,00042	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,0011	0,00098	0,00072	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,002	0,00185	0,00146	0,001	0,00046	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,0011	0,00098	0,00072	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00215	0,00199	0,00158	0,00108	0,0005	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,0011	0,00098	0,00072	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0023	0,00213	0,0017	0,00116	0,00054	
0,5		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00107	0,00096	0,00071	0,00044	0,00018
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00174	0,0016	0,00127	0,00086	0,0004
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00107	0,00096	0,00071	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0019	0,00176	0,00139	0,00094	0,00044	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00107	0,00096	0,00071	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00206	0,0019	0,00151	0,00103	0,00048	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00107	0,00096	0,00071	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00221	0,00205	0,00162	0,00111	0,00052	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00107	0,00096	0,00071	0,00044	0,00018	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00236	0,00219	0,00174	0,00119	0,00056	

Таблица 4.49 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,003$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_p$, г/см ²					
			1	2	5	10	20	
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00427	0,00376	0,00265	0,00158	0,00061	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00438	0,00404	0,00318	0,00214	0,00098	
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00427	0,00376	0,00265	0,00158	0,00061	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00494	0,00456	0,0036	0,00243	0,00112	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00427	0,00376	0,00265	0,00158	0,00061	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00544	0,00503	0,00398	0,0027	0,00125	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00427	0,00376	0,00265	0,00158	0,00061	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00592	0,00548	0,00434	0,00295	0,00137	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00427	0,00376	0,00265	0,00158	0,00061	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00639	0,00592	0,00469	0,0032	0,00149	
	0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00369	0,00327	0,00235	0,00142	0,00056
			$\sigma(\Phi_2)$	0,0046	0,00425	0,00335	0,00225	0,00103
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,00369	0,00327	0,00235	0,00142	0,00056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00513	0,00475	0,00375	0,00254	0,00117	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,00369	0,00327	0,00235	0,00142	0,00056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00563	0,00521	0,00412	0,0028	0,00129	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,00369	0,00327	0,00235	0,00142	0,00056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0061	0,00565	0,00448	0,00304	0,00142	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,00369	0,00327	0,00235	0,00142	0,00056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00657	0,00608	0,00482	0,00329	0,00153	
0,3		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00344	0,00307	0,00223	0,00136	0,00054
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00481	0,00445	0,00351	0,00237	0,00109
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00344	0,00307	0,00223	0,00136	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00533	0,00492	0,00389	0,00264	0,00122	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00344	0,00307	0,00223	0,00136	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00581	0,00537	0,00426	0,00289	0,00134	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00344	0,00307	0,00223	0,00136	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00628	0,00581	0,00461	0,00314	0,00146	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00344	0,00307	0,00223	0,00136	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00674	0,00624	0,00496	0,00338	0,00158	
	0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,0033	0,00295	0,00216	0,00133	0,00054
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00501	0,00463	0,00366	0,00247	0,00114
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,0033	0,00295	0,00216	0,00133	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00551	0,0051	0,00403	0,00273	0,00127	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,0033	0,00295	0,00216	0,00133	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00599	0,00554	0,00439	0,00299	0,00139	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,0033	0,00295	0,00216	0,00133	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00645	0,00597	0,00474	0,00323	0,00151	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,0033	0,00295	0,00216	0,00133	0,00054	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00691	0,0064	0,00509	0,00347	0,00162	
0,5		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,00321	0,00288	0,00212	0,00131	0,00053
			$\sigma(\Phi_2)$	0,00521	0,00481	0,0038	0,00257	0,00119
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,00321	0,00288	0,00212	0,00131	0,00053	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0057	0,00527	0,00417	0,00283	0,00131	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,00321	0,00288	0,00212	0,00131	0,00053	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00617	0,00571	0,00452	0,00308	0,00143	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,00321	0,00288	0,00212	0,00131	0,00053	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00663	0,00614	0,00487	0,00332	0,00155	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,00321	0,00288	0,00212	0,00131	0,00053	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,00709	0,00656	0,00522	0,00356	0,00167	

Таблица 4.50 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,01$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_p$, г/см ²					
			1	2	5	10	20	
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01425	0,01253	0,00885	0,00526	0,00205	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01461	0,01348	0,0106	0,00713	0,00325	
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01425	0,01253	0,00885	0,00526	0,00205	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01646	0,0152	0,012	0,0081	0,00373	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,01425	0,01253	0,00885	0,00526	0,00205	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01814	0,01678	0,01327	0,00899	0,00416	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,01425	0,01253	0,00885	0,00526	0,00205	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01974	0,01827	0,01447	0,00983	0,00457	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,01425	0,01253	0,00885	0,00526	0,00205	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0213	0,01972	0,01564	0,01065	0,00496	
	0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01229	0,01091	0,00784	0,00474	0,00187
			$\sigma(\Phi_2)$	0,01534	0,01417	0,01116	0,00752	0,00344
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,01229	0,01091	0,00784	0,00474	0,00187	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01712	0,01582	0,01249	0,00845	0,00389	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,01229	0,01091	0,00784	0,00474	0,00187	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01876	0,01735	0,01373	0,00932	0,00432	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,01229	0,01091	0,00784	0,00474	0,00187	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02034	0,01882	0,01492	0,01015	0,00472	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,01229	0,01091	0,00784	0,00474	0,00187	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02188	0,02026	0,01608	0,01096	0,00511	
0,3		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01147	0,01024	0,00743	0,00454	0,00181
			$\sigma(\Phi_2)$	0,01604	0,01482	0,01169	0,00789	0,00362
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01147	0,01024	0,00743	0,00454	0,00181	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01775	0,01641	0,01297	0,00879	0,00406	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,01147	0,01024	0,00743	0,00454	0,00181	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01937	0,01791	0,01419	0,00964	0,00447	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,01147	0,01024	0,00743	0,00454	0,00181	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02093	0,01937	0,01536	0,01046	0,00487	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,01147	0,01024	0,00743	0,00454	0,00181	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02246	0,0208	0,01652	0,01126	0,00526	
	0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,011	0,00985	0,00721	0,00443	0,00179
			$\sigma(\Phi_2)$	0,01671	0,01544	0,01219	0,00824	0,00379
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,011	0,00985	0,00721	0,00443	0,00179	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01838	0,01699	0,01344	0,00912	0,00422	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,011	0,00985	0,00721	0,00443	0,00179	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01996	0,01847	0,01464	0,00995	0,00462	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,011	0,00985	0,00721	0,00443	0,00179	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02151	0,01991	0,0158	0,01076	0,00502	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,011	0,00985	0,00721	0,00443	0,00179	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02304	0,02134	0,01695	0,01157	0,00541	
0,5		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,01069	0,00959	0,00706	0,00437	0,00177
			$\sigma(\Phi_2)$	0,01736	0,01605	0,01268	0,00858	0,00396
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,01069	0,00959	0,00706	0,00437	0,00177	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,01899	0,01756	0,0139	0,00944	0,00437	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,01069	0,00959	0,00706	0,00437	0,00177	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02055	0,01902	0,01508	0,01026	0,00478	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,01069	0,00959	0,00706	0,00437	0,00177	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02209	0,02045	0,01624	0,01107	0,00517	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,01069	0,00959	0,00706	0,00437	0,00177	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02362	0,02188	0,01739	0,01187	0,00556	

Таблица 4.51 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,02$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_f$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02849	0,02506	0,0177	0,01052	0,00409
		$\sigma(\Phi_2)$	0,02922	0,02696	0,0212	0,01425	0,0065
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02849	0,02506	0,0177	0,01052	0,00409
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03291	0,03041	0,02399	0,01621	0,00745
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02849	0,02506	0,0177	0,01052	0,00409
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03629	0,03355	0,02654	0,01798	0,00831
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02849	0,02506	0,0177	0,01052	0,00409
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03949	0,03653	0,02894	0,01967	0,00913
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02849	0,02506	0,0177	0,01052	0,00409
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0426	0,03943	0,03129	0,0213	0,00993
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02458	0,02182	0,01568	0,00947	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03069	0,02833	0,02231	0,01503	0,00688
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02458	0,02182	0,01568	0,00947	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03423	0,03163	0,02499	0,0169	0,00779
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02458	0,02182	0,01568	0,00947	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03752	0,0347	0,02746	0,01863	0,00863
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02458	0,02182	0,01568	0,00947	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04068	0,03764	0,02984	0,02029	0,00944
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02458	0,02182	0,01568	0,00947	0,00374
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04377	0,04052	0,03216	0,02192	0,01023
0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02295	0,02047	0,01487	0,00907	0,00362
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03209	0,02964	0,02337	0,01577	0,00724
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02295	0,02047	0,01487	0,00907	0,00362
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03551	0,03283	0,02595	0,01758	0,00812
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02295	0,02047	0,01487	0,00907	0,00362
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03873	0,03583	0,02838	0,01927	0,00894
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02295	0,02047	0,01487	0,00907	0,00362
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04185	0,03874	0,03073	0,02091	0,00974
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02295	0,02047	0,01487	0,00907	0,00362
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04493	0,0416	0,03304	0,02253	0,01053
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02201	0,0197	0,01441	0,00886	0,00357
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03343	0,03089	0,02438	0,01648	0,00759
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02201	0,0197	0,01441	0,00886	0,00357
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03343	0,03089	0,02438	0,01648	0,00759
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02201	0,0197	0,01441	0,00886	0,00357
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03993	0,03694	0,02928	0,0199	0,00925
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02201	0,0197	0,01441	0,00886	0,00357
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04302	0,03982	0,0316	0,02153	0,01004
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02201	0,0197	0,01441	0,00886	0,00357
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04608	0,04268	0,03391	0,02314	0,01082
0,5	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02138	0,01919	0,01412	0,00874	0,00355
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03472	0,03209	0,02536	0,01716	0,00792
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02138	0,01919	0,01412	0,00874	0,00355
		$\sigma(\Phi_2)$	0,03797	0,03512	0,02781	0,01888	0,00875
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02138	0,01919	0,01412	0,00874	0,00355
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04111	0,03804	0,03016	0,02052	0,00955
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02138	0,01919	0,01412	0,00874	0,00355
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04418	0,04091	0,03248	0,02214	0,01034
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02138	0,01919	0,01412	0,00874	0,00355
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04724	0,04375	0,03477	0,02374	0,01112

Таблица 4.52 – Среднеквадратические отклонения шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,03$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_f$, г/см ²					
			1	2	5	10	20	
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,04274	0,03759	0,02655	0,01578	0,00614	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04382	0,04044	0,0318	0,02138	0,00976	
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,04274	0,03759	0,02655	0,01578	0,00614	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04937	0,04561	0,03599	0,02431	0,01118	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,04274	0,03759	0,02655	0,01578	0,00614	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05443	0,05033	0,0398	0,02697	0,01247	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,04274	0,03759	0,02655	0,01578	0,00614	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05923	0,0548	0,04342	0,0295	0,0137	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,04274	0,03759	0,02655	0,01578	0,00614	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0639	0,05915	0,04693	0,03196	0,01489	
	0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03687	0,03273	0,02352	0,01421	0,0056
			$\sigma(\Phi_2)$	0,04603	0,0425	0,03347	0,02255	0,01032
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,03687	0,03273	0,02352	0,01421	0,0056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05135	0,04745	0,03748	0,02535	0,01168	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,03687	0,03273	0,02352	0,01421	0,0056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05628	0,05205	0,0412	0,02795	0,01295	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,03687	0,03273	0,02352	0,01421	0,0056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06102	0,05646	0,04476	0,03044	0,01416	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,03687	0,03273	0,02352	0,01421	0,0056	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06565	0,06078	0,04825	0,03288	0,01534	
0,3		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03442	0,03071	0,0223	0,01361	0,00543
			$\sigma(\Phi_2)$	0,04813	0,04445	0,03506	0,02366	0,01086
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03442	0,03071	0,0223	0,01361	0,00543	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05326	0,04924	0,03892	0,02636	0,01218	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03442	0,03071	0,0223	0,01361	0,00543	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0581	0,05374	0,04257	0,02891	0,01341	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03442	0,03071	0,0223	0,01361	0,00543	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06278	0,05811	0,04609	0,03137	0,01461	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03442	0,03071	0,0223	0,01361	0,00543	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06739	0,0624	0,04955	0,03379	0,01579	
	0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03301	0,02955	0,02162	0,0133	0,00536
			$\sigma(\Phi_2)$	0,05014	0,04633	0,03657	0,02472	0,01138
0,5		$\sigma(\Phi_1)$	0,03301	0,02955	0,02162	0,0133	0,00536	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05513	0,05098	0,04033	0,02735	0,01265	
0,7		$\sigma(\Phi_1)$	0,03301	0,02955	0,02162	0,0133	0,00536	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05989	0,05541	0,04391	0,02985	0,01387	
0,9		$\sigma(\Phi_1)$	0,03301	0,02955	0,02162	0,0133	0,00536	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06453	0,05974	0,04741	0,03229	0,01506	
1,1		$\sigma(\Phi_1)$	0,03301	0,02955	0,02162	0,0133	0,00536	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06913	0,06402	0,05086	0,03471	0,01624	
0,5		0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03207	0,02878	0,02118	0,0131	0,00532
			$\sigma(\Phi_2)$	0,05208	0,04814	0,03804	0,02575	0,01188
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03207	0,02878	0,02118	0,0131	0,00532	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05696	0,05269	0,04171	0,02831	0,01312	
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03207	0,02878	0,02118	0,0131	0,00532	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05696	0,05269	0,04171	0,02831	0,01312	
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03207	0,02878	0,02118	0,0131	0,00532	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06627	0,06136	0,04872	0,03321	0,01551	
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03207	0,02878	0,02118	0,0131	0,00532	
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07086	0,06563	0,05216	0,03562	0,01668	

В таблицах 4.53 – 4.57 приведены максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$), массовые толщины $(\rho H)_t$ изменяются от 1 до 20 г/см² для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0=0,001; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03$.

Таблица 4.53 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,001$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	2,22	2,1	2,07	2,1	2,07
0,2	1,93	1,89	1,88	1,88	1,9
0,3	1,87	1,85	1,84	1,85	1,9
0,4	1,88	1,88	1,86	1,88	1,96
0,5	1,89	1,9	1,92	1,95	1,98

Таблица 4.54 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,003$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	5,98	5,85	5,9	5,81	5,83
0,2	5,38	5,29	5,8	5,73	5,32
0,3	5,2	5,15	5,25	5,27	5,27
0,4	5,2	5,16	5,21	5,32	5,43
0,5	5,37	5,34	5,33	5,46	5,55

Таблица 4.55 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0,01$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	24,82	23,61	22,39	22,15	21,68
0,2	17,52	17,26	16,96	17,29	17,13
0,3	16,62	16,48	16,64	16,76	16,84
0,4	16,65	16,63	16,9	17,03	17,5
0,5	16,89	17,03	17,1	18,51	19,57

Таблица 4.56 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,02$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	89,71	87,3	87,48	82,29	82,59
0,2	60,61	58,85	55,05	55,75	54,05
0,3	48,96	48,69	47,38	45,64	45,64
0,4	46,11	42,83	42,94	41,64	41,63
0,5	43,19	41,5	45,34	47,67	47,5

Таблица 4.57 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,03$) при изменении H_1 и H_f

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	131,7	133,2	128,5	127,7	128,4
0,2	106,2	105,2	105,4	103,1	102,4
0,3	95,3	92,2	88,9	91,7	87,9
0,4	85,8	84,4	84,9	81,7	81,9
0,5	80,9	77,5	78,2	75,8	80,7

На рисунках 4.19–4.23 для наглядности представлены графики максимальных относительных погрешностей $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых ОК с эффективным атомным номером $Z=7$ для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0=0,001$; 0,003; 0,01; 0,02; 0,03.

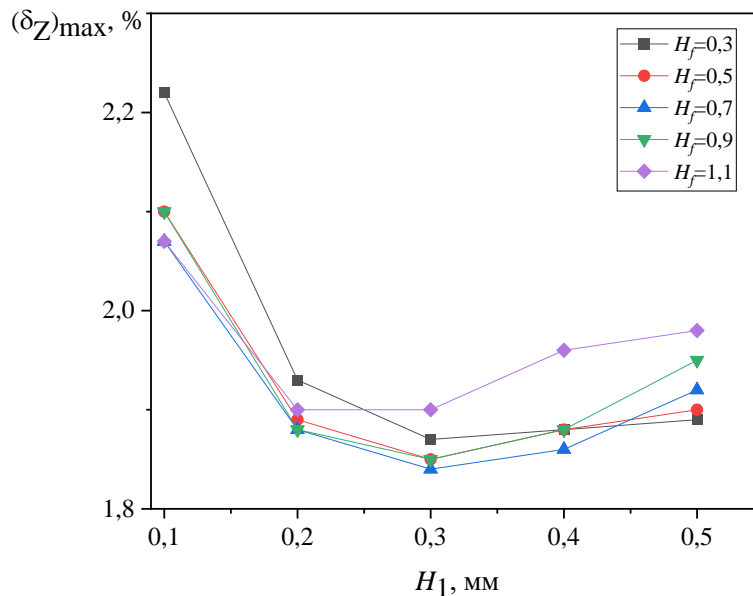


Рисунок 4.19 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7$, $\sigma_0=0,001$)

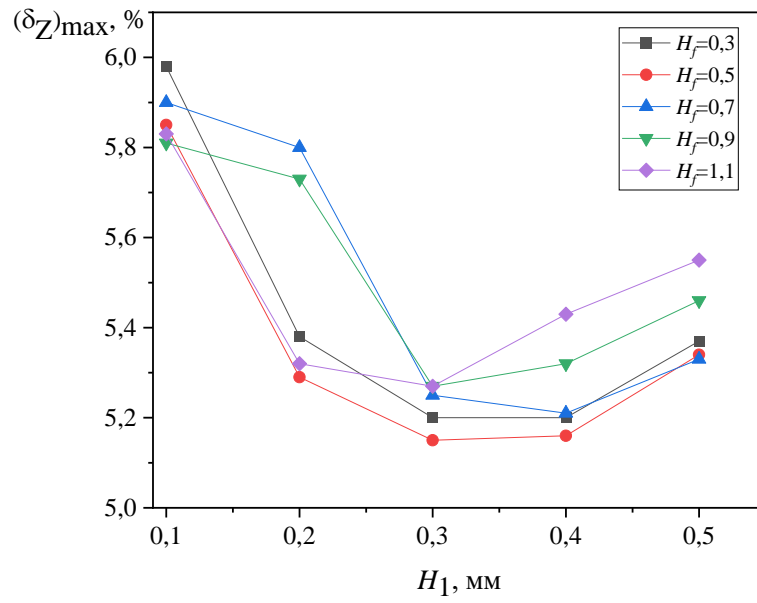


Рисунок 4.20 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0.003$)

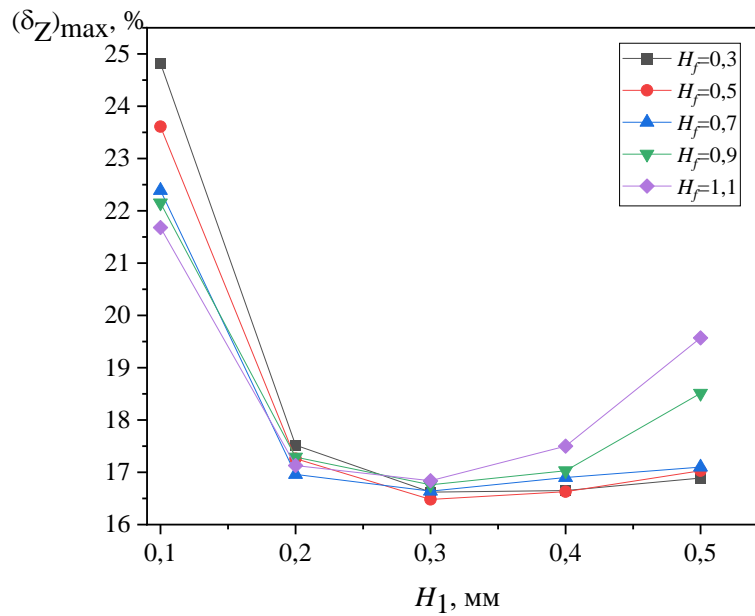


Рисунок 4.21 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0.01$)

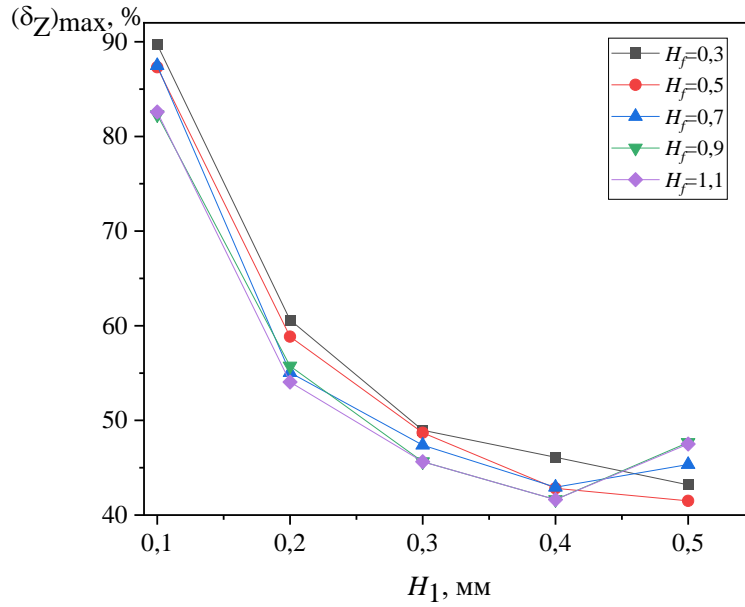


Рисунок 4.22 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0.02$)

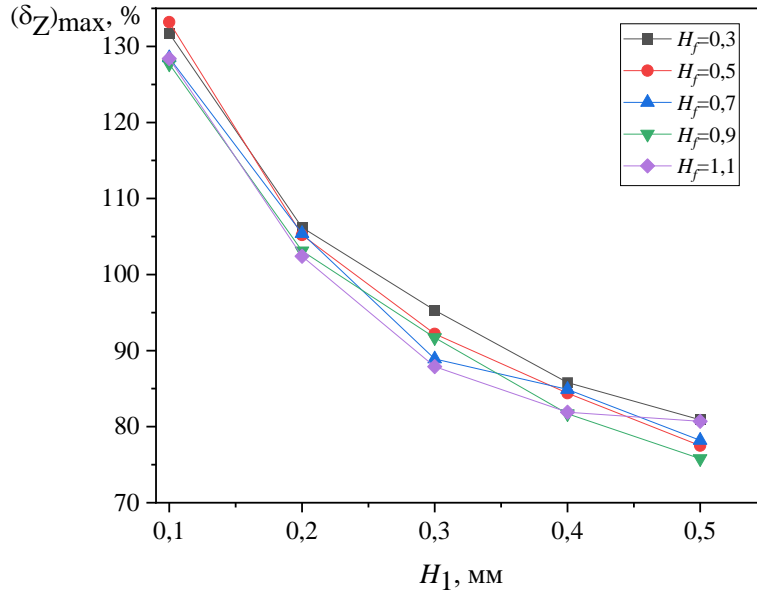


Рисунок 4.23 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых объектов контроля ($Z=7, \sigma_0=0.03$)

В таблице 4.58 по данным из таблиц 4.53–4.57 в соответствии с формулой (4.4) приведены 5%-ные промежутки $Q(\sigma_0)$ минимальных значений максимальной

относительной погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ при использовании РЧЭ первых детекторов из селенида цинка для разных значений параметра σ_0 .

Таблица 4.58 – 5%-ные промежутки минимальных значений максимальной относительной погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ при использовании РЧЭ первых детекторов из селенида цинка для разных значений параметра σ_0

σ_0	0,001	0,003	0,01	0,02	0,03
$Q(\sigma_0)$	[1,84; 1,93]	[5,15; 5,41]	[16,48; 17,3]	[41,5; 43,6]	[75,8; 79,6]

В таблицах 4.59 – 4.63, с учетом таблиц 4.53 – 4.58, приведены локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из селенида цинка. Прочерки в данных таблицах означают отсутствие соответствующих значений.

Таблица 4.59 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из селенида цинка для $\sigma_0 = 0,001$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	–	0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1	0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1	0,3; 0,5; 0,7; 0,9	0,3; 0,5; 0,7

Таблица 4.60 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из селенида цинка для $\sigma_0 = 0,003$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	–	0,3; 0,5; 1,1	0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1	0,3; 0,5; 0,7; 0,9	0,3; 0,5; 0,7

Таблица 4.61 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из селенида цинка для $\sigma_0 = 0,01$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	–	0,5; 0,7; 0,9; 1,1	0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1	0,3; 0,5; 0,7; 0,9	0,3; 0,5; 0,7

Таблица 4.62 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из селенида цинка для $\sigma_0 = 0,02$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	–	–	–	0,5; 0,7; 0,9; 1,1	0,3; 0,5

Таблица 4.63 – Локально-оптимальные пары значений параметров H_1 и H_f при использовании РЧЭ первых детекторов из селенида цинка для $\sigma_0 = 0,03$

H_1 , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H_f , мм	–	–	–	–	0,5; 0,7; 0,9

Как следует из табл. 4.59 – 4.63 чаще всего (все 5 раз) в них встречается следующая пара значений параметров H_1 и H_f , которая и будет являться оптимальной, а именно:

$$H_{1\text{opt}} = 0,5 \text{ мм}, H_{f\text{opt}} = 0,5 \text{ мм}. \quad (4.10)$$

Были получены значения параметров сэндвич-детекторов излучения (формула (4.10)), которые являются оптимальными при распознавании материалов с ЭАН равным 7 для случая, когда материалом РЧЭ первых детекторов является селенид цинка (ZnSe).

В [76] на основе критерия (4.8) были получены следующие оптимальные значения параметров H_1 и H_f для $E_0 = 160$ кэВ применительно к сэндвич-детекторам, где материалом первых детекторов являлся селенид цинка:

$$H_1 = 0,5 \text{ мм}, H_f = 0,6 \text{ мм}. \quad (4.11)$$

Для сравнения пар (4.10) и (4.11) между собой по значениям соответствующим им погрешностям $(\delta_z)_{\text{max}}$ нами было проведено дополнительное моделирование для пары (4.11). Результаты этого моделирования представлены в таблице 4.64.

Таблица 4.64 – Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (%) для тестовых материалов ($Z=7$) при использовании РЧЭ первых детекторов из селенида цинка с $H_1=0,5$ мм и $H_f=0,6$ мм для разных значений параметра σ_0

$(\delta_Z)_{\max}$, (%)	1,92	5,3	17,03	40,97	77,52
σ_0	0,001	0,003	0,01	0,02	0,03

Как следует из табл. 4.53 – 4.57 и табл. 4.64 значения погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ для пары (4.11) практически совпадают со значениями этой погрешности для пары (4.10) для всех рассматриваемых значений параметра σ_0 . Отсюда вытекает, что полученная в [76] оптимальная пара (4.11) равнозначна по величине погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ с полученной нами оптимальной парой (4.10) и, поэтому, пару (4.11) также следует считать оптимальной парой по используемому нами критерию (4.9). Между тем, если принять во внимание экономический фактор (минимизация затрат материалов на изготовление сэндвич-детекторов), то предпочтение следует отдать паре (4.10).

4.5. Оптимальный выбор значений параметров сэндвич-детекторов излучения

В параграфах 4.2 – 4.4 нами были получены оптимальные пары значений параметров H_1 , H_f сэндвич-детекторов излучения для заданных значений параметра Z_1 , т.е. для заданных материалов РЧЭ первых детекторов. Рассмотрим теперь задачу оптимального выбора значения параметра Z_1 . Иными словами рассмотрим задачу оптимального выбора материала РЧЭ первых детекторов. Для ее решения используем подход, основанный на попарном сравнительном анализе 5%-ных промежутков $Q(\sigma_0)$ минимальных значений максимальной относительной погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, соответствующих разным значениям параметров Z_1 и σ_0 . В табл. 4.65 приведены указанные промежутки согласно данным из табл. 4. 21, 4.39 и 4.58.

Таблица 4.65 – 5%-ные промежутки $Q(\sigma_0)$ минимальных значений максимальной относительной погрешности $(\delta_Z)_{\max}$ для разных значений параметров Z_1 и σ_0

σ_0	$Q(\sigma_0)$		
	$Z_1 = 54$ (CsI)	$Z_1 = 32$ (Gd ₂ O ₂ S)	$Z_1 = 32$ (ZnSe)
0,001	[2,04; 2,14]	[3,03; 3,18]	[1,84; 1,93]
0,003	[5,72; 6,01]	[8,16; 8,57]	[5,15; 5,41]
0,01	[18,68; 19,61]	[26,98; 28,33]	[16,48; 17,3]
0,02	[41,7; 43,79]	[54,35; 57,07]	[41,5; 43,6]
0,03	[73,8; 77,49]	[84,31; 88,53]	[75,8; 79,6]

Обозначим через $Q(\sigma_0, \text{CsI})$ промежуток $Q(\sigma_0)$, соответствующий материалу РЧЭ первых детекторов из иодида цезия. Аналогично этому будем использовать обозначения $Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$ и $Q(\sigma_0, \text{ZnSe})$ для тех случаев, когда материалами РЧЭ первых детекторов являются оксисульфид гадолиния и селенид цинка, соответственно.

При сравнении промежутков $Q(\sigma_0, \text{CsI})$ и $Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$ между собой для фиксированного значения параметра σ_0 логично руководствоваться следующими правилами:

- 1) если промежуток $Q(\sigma_0, \text{CsI})$ не пересекается с промежутком $Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$ и при этом располагается левее его, то предпочтение отдается иодиду цезия;
- 2) если промежуток $Q(\sigma_0, \text{CsI})$ не пересекается с промежутком $Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$ и при этом располагается правее его, то предпочтение отдается оксисульфиду гадолиния;
- 3) если промежутки $Q(\sigma_0, \text{CsI})$ и $Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$ пересекаются, то предпочтение между иодидом цезия и оксисульфидом гадолиния отсутствует.

По аналогичным правилам будет осуществляться сравнение промежутков $Q(\sigma_0, \text{CsI})$, $Q(\sigma_0, \text{ZnSe})$ и промежутков $Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$, $Q(\sigma_0, \text{ZnSe})$.

В табл. 4.66 – 4.68 приведены результаты вышеописанных сравнений.

Таблица 4.66 – Сравнение промежутков $Q(\sigma_0, \text{CsI})$ и $Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$ для разных значений параметра σ_0

σ_0	$Q(\sigma_0, \text{CsI})$	$Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$	Предпочтение
0,001	[2,04; 2,14]	[3,03; 3,18]	CsI
0,003	[5,72; 6,01]	[8,16; 8,57]	CsI
0,01	[18,68; 19,61]	[26,98; 28,33]	CsI
0,02	[41,7; 43,79]	[54,35; 57,07]	CsI
0,03	[73,8; 77,49]	[84,31; 88,53]	CsI

Таблица 4.67 – Сравнение промежутков $Q(\sigma_0, \text{CsI})$ и $Q(\sigma_0, \text{ZnSe})$ для разных значений параметра σ_0

σ_0	$Q(\sigma_0, \text{CsI})$	$Q(\sigma_0, \text{ZnSe})$	Предпочтение
0,001	[2,04; 2,14]	[1,84; 1,93]	ZnSe
0,003	[5,72; 6,01]	[5,15; 5,41]	ZnSe
0,01	[18,68; 19,61]	[16,48; 17,3]	ZnSe
0,02	[41,7; 43,79]	[41,5; 43,6]	Отсутствует
0,03	[73,8; 77,49]	[75,8; 79,6]	Отсутствует

Таблица 4.68 – Сравнение промежутков $Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$ и $Q(\sigma_0, \text{ZnSe})$ для разных значений параметра σ_0

σ_0	$Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$	$Q(\sigma_0, \text{ZnSe})$	Предпочтение
0,001	[3,03; 3,18]	[1,84; 1,93]	ZnSe
0,003	[8,16; 8,57]	[5,15; 5,41]	ZnSe
0,01	[26,98; 28,33]	[16,48; 17,3]	ZnSe
0,02	[54,35; 57,07]	[41,5; 43,6]	ZnSe
0,03	[84,31; 88,53]	[75,8; 79,6]	ZnSe

Как следует из табл. 4.66–4.68 лучшим материалом для РЧЭ первых детекторов (среди трех рассматриваемых) является селенид цинка (ZnSe). Далее по степени предпочтения (оптимальности) следует иодида цезия (CsI), а за ним – оксисульфид гадолиния ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$). Отсюда, с учетом (4.10), окончательно получаем следующие оптимальные значения параметров сэндвич-детектора:

$$Z_{1\text{opt}}=32(\text{ZnSe}); H_{1\text{opt}}=0,5 \text{ мм}, H_{f\text{opt}}=0,5 \text{ мм}. \quad (4.12)$$

Таким образом, предложенный нами алгоритм позволил получить значения параметров сэндвич-детекторов излучения (формула (4.12)), которые являются оптимальными при распознавании материалов с ЭАН равным 7.

4.6 Выводы по главе 4

1. Разработан алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов излучения по критерию минимума максимальной относительной погрешности оценки эффективного атомного номера материалов объектов контроля методом дуальных энергий, порождаемой квантовой природой рентгеновского излучения.
2. На основе разработанного алгоритма получены оптимальные значения толщины радиационно-чувствительного элемента (сцинтиллятора) первого детектора и толщины промежуточного фильтра из меди для сэндвич-детектора рентгеновского излучения, используемого при распознавании материалов с ЭАН равным 7 и содержащего сцинтиллятор для первого детектора, изготовленный либо из иодида цезия, либо из оксисульфида гадолиния, либо из селенида цинка.
3. Для распознавания материалов с ЭАН равным 7 по эффективному атомному номеру предпочтение следует отдать сэндвич-детекторам рентгеновского излучения, у которых радиационно-чувствительные элементы (сцинтилляторы) для первых детекторов изготовлены из селенида цинка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Проведён обзор научной литературы, посвященный анализу современного состояния и перспективам совершенствования систем сканирующей радиографии с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий, в результате которого было, в частности, установлено, что при досмотровом контроле багажа и ручной клади пассажиров чаще всего применяются сканирующие системы цифровой рентгенографии, содержащие сэндвич-детекторы рентгеновского излучения.

2. Для повышения эффективности досмотрового контроля необходимо совершенствование рентгеновских досмотровых систем, в частности, за счет оптимизации их параметров и создания более высокоточных алгоритмов обработки и анализа измерительной информации.

3. Разработана математическая модель радиационных прозрачностей ОК при использовании сэндвич-детекторов для регистрации излучения, которая учитывает немонотонность рентгеновского излучения и шумы, обусловленные его квантовой природой.

4. Получена аналитическая оценка коэффициента корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора рентгеновского излучения. Результаты вычислительных экспериментов, полученные на ее основе для типичных тестовых материалов, используемых при рентгеновском досмотре багажа и ручной клади (углерод, алюминий и железо), показали, что для широкого диапазона тестовых ОК коэффициент корреляции данных сигналов имеет достаточно низкое значение. Это позволило при статистическом моделировании радиационных прозрачностей ОК исходить из предположения, что указанные сигналы являются независимыми случайными величинами.

5. Разработан алгоритм оценки погрешностей, обусловленных квантовой природой рентгеновского излучения, при распознавании материалов методом

дуальных энергий в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения.

6. Разработан алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов рентгеновского излучения по критерию минимума максимальной относительной погрешности оценки эффективного атомного номера материала объекта контроля методом дуальных энергий, порождаемой квантовой природой излучения.

7. Решена задача оптимального выбора значений толщины радиационно-чувствительного элемента (сцинтиллятора) первого детектора и толщины промежуточного фильтра из меди для сэндвич-детектора рентгеновского излучения, используемого при распознавании материалов с эффективным атомным номером равным 7, для максимальной энергии в спектре рентгеновского излучения, равной 160 кэВ, что является ее типичным значением для рентгеновских систем досмотрового контроля багажа и ручной клади. Данная задача решена для каждого из трех сцинтилляторов: иодид цезия, оксисульфид гадолиния и селенид цинка.

8. Для распознавания материалов по эффективному атомному номеру предпочтение следует отдать сэндвич-детекторам рентгеновского излучения, у которых радиационно-чувствительные элементы (сцинтилляторы) для первых детекторов изготовлены из селенида цинка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карпова, Л. И. Современные технические средства авиационной безопасности / Л. И. Карпова, Д. А. Никитин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2010. – № 155. – С. 34–40.
2. Бочкарев, А. Н. Многоуровневый досмотр в аэропортах / А. Н. Бочкарев, И. А. Бочкарев // Мир транспорта. – 2012. – № 4 (42). – С. 146–149.
3. Ганиев, Ш. Ф. Система сертификации в области авиационной безопасности: учебное пособие / Ш. Ф. Ганиев. – М.: ИД Академии Жуковского, 2021. – 48 с.
4. Бражников, Д. А. Противодействие незаконному обороту ядерных, радиоактивных и других материалов, представляющих повышенную опасность / Д. А. Бражников, Е. Н. Яковец, А. П. Мясников // Вестник Российской таможенной академии. – 2022. – № 2. – С. 113–121.
5. Khan, S. U. A review of airport dual energy X-ray baggage inspection techniques: image enhancement and noise reduction / S. U. Khan, I. U. Khan, I. Ullah, N. Saif, I. Ullah // Journal of X-ray Science and Technology. – 2020. – V. 28 (3). – P. 481 – 505.
6. Yalçın, O. Detection of explosive materials in dual-energy X-Ray security systems / O. Yalçın, I. A. Reyhancan // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2022. – V. 1040. – 167265.
7. Chang, C. H. Calculation of effective atomic numbers using a rational polynomial approximation method with a dual-energy X-ray / C. H. Chang, Y. C. Ni, S. P. Tseng // Journal of X-Ray Science and Technology. – 2021. – V. 29 (2). – P. 317–330.
8. Yim, C.W. A MCNP simulation for a new dual-energy dual-beam X-ray inspection method using multi-angle compton scattering to determine the effective atomic number of explosives / C. W. Yim, S. G. Hong // Radiation Physics and Chemistry. – 2022. – V. 195. – 110084.

9. Duvillier, J. Inline multi-material identification via dual energy radiographic measurements / J. Duvillier, M. Dierick, J. Dhaene, L. D. Van, B. Masschaele, R. Geurts, L.V. Hoorebeke, M.N. Boone // *NDT & E International*. – 2018. – V. 94. – P. 120–125.
10. Cordova, A. Technologies for primary screening in aviation security / A. Cordova // *Journal of Transportation Security*. – 2022. – V. 15 (3). – P. 141–159.
11. Linardatos, D. On the response of a micro non-destructive testing X-ray detector / D. Linardatos, V. Koukou, N. Martini, A. Konstantinidis, A. Bakas, G. Fountos, I. Valais, C. Michail // *Materials*. – 2021. – 14 (4). – 888. <https://doi.org/10.3390/ma14040888>.
12. Vukadinovic, D. X-ray baggage screening and AI / D. Vukadinovic, D. Anderson // EUR 31123 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. – 2022.
13. Хухрыгин, А. П. Рентгенотелевизионные досмотровые установки как базовый элемент антитеррористических мероприятий / А. П. Хухрыгин // *Формула безопасности*. – 2008. – № 2. – С. 56–60.
14. Илькухин, Н. Ю. Исследование технологий детектирования взрывчатых веществ в процедурах обеспечения авиационной безопасности : дис. ... к.т.н. : 05.22.14 / Илькухин Никита Юрьевич. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации. – 2016. – 137 с.
15. Билько, Г. Е. Применение рентгеновских досмотровых комплексов обратного рассеяния при таможенном контроле после выпуска товаров мобильными группами / Г.Е. Билько, В.Ф. Вербов // *Вестник Российской таможенной академии*. – 2021. – № 1. – С. 49–53.
16. Духницкий, П. С. Современные технические средства таможенного контроля для досмотра контейнеров: сборник трудов конференции. // *Актуальные направления научных исследований: от теории к практике : материалы VIII Междунар. науч.–практ. конф. (Чебоксары, 8 мая 2016 г.)*. В 2 т. Т. 2 / редкол.: О.

Н. Широков [и др.] – Чебоксары: Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2016. – Т. 2, №2 (8). – С. 25–28.

17. Дьяконов, В. Н. Теория и практика применения технических средств таможенного контроля: учеб. пособие / В. Н. Дьяконов, Ю. В. Малышенко; под ред. Ю. В. Малышенко. – Владивосток: ВФ РТА, 2004. – 352 с.

18. Башлы, П. Н. Инновационные технологии таможенного контроля / П. Н. Башлы, Д. А. Безуглов, В. Ф. Вербов, С. Н. Гамидуллаев // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 4–1. – С. 19–23.

19. Уголков, С. В. Охранные системы на транспорте / С. В. Уголков, А. Н. Гардюк // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. – 2019. – № 5–6 (131–132). – С. 40–48.

20. Osipov, S.P. Identification of materials in X-Ray inspections of objects by the dual-energy method / S.P. Osipov, V.A. Udod, Y. Wang // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2017. – V. 53 (8). – P. 568 – 587. <https://doi.org/10.1134/S1061830917080058> [Осипов, С.П. Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов / С.П. Осипов, В.А. Удод, Я. Ван // *Дефектоскопия*. – 2017.– № 8.– С. 33 – 56.].

21. Kayalvizhi, R. Raw data processing techniques for material classification of objects in dual energy X-ray baggage inspection systems / R. Kayalvizhi, S. Malarvizhi, A. Topkar, P. Vijayakumar // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2022. – V. 193. – 109512.

22. Mamchur, D. Application and advances in radiographic and novel technologies used for non-intrusive object inspection / D. Mamchur, J. Peksa, C. S. Le, R. Vinuesa // *Sensors*. – 2022. – V. 22 (6). – 2121.

23. Лебедев М. Б. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии / М. Б. Лебедев, О. А. Сидуленко, В. А. Удод // *Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]*. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 47–55

24. Busi, M. Effective atomic number and electron density determination using spectral x-ray CT / M. Busi, J. Kehres, M. Khalil, U.L. Olsen // *Anomaly Detection and Imaging with X-rays (ADIX) IV*. SPIE. – 2019. – V. 10999. – P. 7–17.
25. Jumanazarov, D. System-independent material classification through X-ray attenuation decomposition from spectral X-ray CT / D. Jumanazarov, J. Koo, M. Busi, H.F. Poulsen, U.L. Olsen, M. Iovea // *NDT & E International*. – 2020. – V. 116. – 102336.
26. Iovea, M. Dedicated on-board dual-energy computer tomograph / M. Iovea, M. Neagu, O.G. Dului, G. Oaie, S. Szobotka, G. A. Mateiasi // *J. Nondestruct Eval.* – 2011. – V. 30. – P. 164–171.
27. Smith, R.C. CT technologies / R.C. Smith, J.M. Connelly // *Counterterrorist Detection Techniques of Explosives*. – 2022. – P. 29–45.
28. Alvarez, R.E. Invertibility of the dual energy x-ray data transform / R.E. Alvarez // *Medical Physics*. – 2019. – V. 46 (1). – P. 93–103.
29. Osipov, S. Estimation of the effective mass thickness and effective atomic number of the test object material by the dual energy method / S. Osipov, S. Chakhlov, V. Udod, E. Usachev, S. Schetinkin, E. Kamysheva // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2020. – V. 168. – 108543.
30. Zhang, Y. On using XMC R-CNN model for contraband detection within X-ray baggage security images / Y. Zhang, W. Kong, D. Li, X. Liu // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2020. – V. 2020. – 1823034.
31. Штейн, А. М. Применение частотно-импульсных рентгеновских аппаратов для реализации режима дуальной энергии / А. М. Штейн // *Контроль. Диагностика*. – 2013. – № 13. – С. 117–122.
32. Сидуленко, О. А. Исследование возможности применения малогабаритных бетатронов для идентификации веществ объектов контроля методом дуальных энергий / О. А. Сидуленко, В. А. Касьянов, С. В. Касьянов, С. П. Осипов // *Контроль. Диагностика*. – 2008. – № 8. – С. 46–52.

33. Чахлов, С. В. Высокоэнергетический метод дуальных энергий для идентификации веществ объектов контроля / С. В. Чахлов, С. П. Осипов // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 9. – С. 9–17.

34. Бердников, Я. А. Реализация метода дуальной энергии в рентгеновской томографии / Я. А. Бердников, А. В. Головин, Д. О. Спирин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2009. – № 1. – С. 111–114.

35. Бердников, Я.А. Применение алгоритма кластеризации для определения элементного состава в томографии / Я. А. Бердников, А. В. Головин, Д. О. Спирин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2009. – № 3. – С. 35–40.

36. Alvarez, R.E. Analytic models for Single-shot x-ray imaging / R. E. Alvarez // Preprint. – 2019. – P. 43.

37. Огородников, С.А. Распознавание материалов при радиационном таможенном контроле на базе линейного ускорителя электронов : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.20 / Огородников Сергей Анатольевич. – Санкт-Петербург, 2002. – 121 с.

38. Свистунов, Ю.А. Развитие работ по созданию рентгеновских и ядерно-физических инспекционных комплексов в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова / Ю.А. Свистунов, М.Ф. Ворогушин, В.И. Петрунин, А.В. Сидоров, Ю.Н. Гавриш, А.М. Фиалковский // Problems of atomic science and technology. 2006. – №. 3. P. 171 – 173.

39. Fredenberg, E. Spectral and dual-energy X-ray imaging for medical applications / E. Fredenberg // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – V. 878. – P. 74–87.

40. Zhao, S. An oblique projection modification technique (OPMT) for fast multispectral CT reconstruction / S. Zhao, H. Pan, W. Zhang, D. Xia, X. Zhao // *Physics in Medicine & Biology*. – 2021. – V. 66 (6). – 065003.
41. Инспекционно-досмотровые комплексы. Общая часть. Учебно-методическое справочное пособие / А. Н. Мячин, Ю. Г. Улупов, В. А. Зубов, С. Л. Лукоянов– СПб: РИО СПб филиала РТА, – 2007. – 160 с.
42. Попов, О. Р. Мобильные инспекционно-досмотровые комплексы-возможности, технологические особенности, перспективы развития / О. Р. Попов, А. В. Шевцов // *Вестник Российской таможенной академии*. – 2008. – № 4. – С. 52–58.
43. Улупов, Ю. Г. Инспекционно-досмотровые комплексы: новые возможности таможенной службы России / Ю. Г. Улупов, Д. А. Мячин, В. А. Черных // *Ученые записки имени В.Б. Бобкова филиала Российской Таможенной Академии*. – 2007. – № 3. – С. 49–60.
44. Kim, K. H. Design of parallel dual-energy X-ray beam and its performance for security radiography / K. H. Kim, S. M. Myoung, Y. H. Chung // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. – 2011. – V. 652 (1). – P. 66–68.
45. Askari, M. A new method for detecting the radioactive materials using X or γ -ray cargo inspection systems / M. Askari, A.M. Beigzadeh, A. Taheri // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2021. – V. 1003. – 165325.
46. Bendahan, J. Vehicle and cargo scanning for contraband / J. Bendahan // *Physics Procedia*. – 2017. – V. 90. – P 242–255.
47. Rahon, J. Hydrogenous content identification in heterogeneous cargoes via multiple monoenergetic neutron radiography / J. Rahon, A. Danagoulian // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2020. – V. 949. – 162860.
48. Ghaebi, M. Studying the effect of the scanned objects' location on material discrimination in a dual-energy cargo inspection system / M. Tajik, R. Azimirad //

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2022. – V. 510. – P. 39–48.

49. Abbasi, S. A novel dual high-energy X-ray imaging method for materials discrimination / S. Abbasi, M. Mohammadzadeh, M. Zamzamian // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – V. 930. – P. 82–86.

50. Lee, D. Efficient material decomposition method for dual-energy X-ray cargo inspection system / D. Lee, J. Lee, J. Min, B. Lee, B. Lee, K. Oh, J. Kim, S. Cho // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – V. 884. – P. 105–112.

51. Ermakov, A.N. Linacs for industry, cargo inspection and medicine designed by moscow university / A.N. Ermakov, A.S. Alimov, L.Yu. Ovchinnikova, A.N. Kamanin, V.V. Khankin, N.I. Pakhomov, N.V. Shvedunov, V.I. Shvedunov, D.S. Yurov // LINAC2018 : Beijing, China. – 2018. – P. 130–132.

52. Гавриш, Ю. Н. Досмотровый радиометрический комплекс для контроля крупногабаритных автотранспортных средств и грузов / Ю. Н. Гавриш [и др.] // ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования». – 2010. – Т. 53. – № 2. – С. 3–8.

53. Усачев Е. Ю. Досмотровые комплексы для контроля грузового автотранспорта, разработанные мирэа / Е. Ю. Усачев [и др.] // Информационные технологии неразрушающего контроля : сборник научных трудов Российской школы конференции с международным участием, Томск, 27-30 октября 2015 г. – Томск : Изд-во ТПУ. – 2015. – С. 73–82.

54. Спирин, Д.О. Принципы интроскопии крупногабаритных грузов / Д. О. Спирин, Я. А. Бердников, Ю. Н. Гавриш // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2010. – № 2. – С. 120–127.

55. Спирин, Д.О. Оптимизация параметра дискриминации в методе дуальных энергий / Д. О. Спирин, А. Я. Бердников, С. И. Марков, А. С. Сафонов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного

политехнического университета. Физико-математические науки. – 2011. – № 4. – С. 171–176.

56. Руденок, В. П. Виды рентгеновской досмотровой техники по обеспечению безопасности / В. П. Руденок, И. И. Никитченко, В. В. Балакирев // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. – 2015. – № 6. – С. 136–142.

57. Bogowicz, J. Development of X-ray scanning system Sowa / J. Bogowicz, M. Chabera, W. Dziewiecki, T. Zakrzewski // NUKLEONIKA. – 2020. – V. 65 (4). – P. 229–232.

58. Moshkbar-Bakhshayesh, K. Developing a new approach for material discrimination using modular radial basis neural networks detection / K. Moshkbar-Bakhshayesh // Annals of Nuclear Energy. – 2023. – V. 188. – P. 1–9.

59. Bairashewski, D. A. Development of the X-ray Security Screening Systems at ADANI / D. A. Bairashewski, G. Yu. Drobychev, V. A. Karas, V. V. Komarov, M. V. Protsko // Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies. – 2018. – V. 227. – P. 249–259.

60. Ghaebi, M. Investigating four algorithms for material discrimination in a simulated dual-energy radiography system / M. Ghaebi, M. Tajik, R. Azimirad // Applied Radiation and Isotopes. – 2023. – V. 199. – 110915.

61. Osipov, S. P. Inspection of bulk cargoes and liquids by the dual energy method / S. P. Osipov, E. Ju Usachevb, S. V. Chakhlov, S. A. Schetinkinb, O. S. Osipov // Radiation Physics and Chemistry. – 2020. – V. 177. – 109133.

62. Chen, G. Understanding X-ray cargo imaging / G. Chen // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2005. – V. 241. – P. 810–815.

63. Yagoub, B. X-ray image denoising for Cargo Dual Energy Inspection System / B. Yagoub, H. Ibrahim, A. Salem, J.-W. Suh, H. S. Kang // International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC) : Jeju, Korea. – 2021. – P. 1–4.

64. Lee, D. Effective Noise Reduction Algorithm For Material Decomposition In Dual-Energy X-Ray Inspection / D. Lee, H. Jo, S. Shim, J. Kim, K. Oh, B. Lee, N.

Lee, S. Cho // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2020. –V. 968. – 163930.

65. Domingo, M. Computer Vision for X-Ray Testing / M. Domingo. – Switzerland : Springer Cham, 2015. – 347 p.

66. Domingo, M. X-Ray Baggage Inspection With Computer Vision: A Survey / M. Domingo, D. Saavedra, M. Prasad // IEEE. – 2020. – V. 8. – P. 145620–145633.

67. Velayudhan, D. Recent Advances in Baggage Threat Detection: A Comprehensive and Systematic Survey / D. Velayudhan, T. Hassan, E. Damiani, N. Werghi // ACM Computing Surveys. – 2022. – V. 55. – № 8. – P. 1–38.

68. Wu J. Object Detection and X-Ray Security Imaging: A Survey / J. Wu, X. Xu, J. Yang // IEEE Access. – 2023. – V. 11. – P. 45416–45441.

69. Xiang, N. Material-Aware Path Aggregation Network and Shape Decoupled SIOU for X-ray Contraband Detection /N. Xiang, Z. Gong, Y. Xu, L. Xiong // Electronics. – 2023. – V. 12 (5). – 1179.

70. Назаренко, С.Ю. Применение искусственных нейронных сетей в радиационном неразрушающем контроле / С. Ю. Назаренко, В.А. Удод // Дефектоскопия. – 2019. – № 6. – С. 53–64.

71. Moshkbar-Bakhshayesh, K. Inspection of cargo using dual-energy X-ray radiography: A review / K. Moshkbar-Bakhshayesh, H. Afarideh, R. Azimirad, // Radiation Physics and Chemistry. – 2023. – V. 212. – 111180.

72. Brooks, R.A. Split-detector computed tomography: A preliminary report / R.A. Brooks, G. Di Chiro // Radiology. – 1978. – V. 126. – P. 255–257.

73. Осипов, С.П. Выбор параметров детекторов в методе распознавания материалов на основе разделения мягкой и жесткой составляющих рентгеновского излучения / С. П. Осипов, Е. Ю. Усачев, С. В. Чахлов, С. А. Щетинкин, Е. Н. Камышева // Дефектоскопия. – 2018. – № 11. – С. 60–71.

74. Kim, K. New sandwich type detector module and its characteristics for dual x-ray baggage inspection system / К Kim, I. S. Jun, Y. S. Eun // Nuclear Science Symposium Conference Record : USA. – 2007. – P. 1191–1194.

75. Kim, K New Detector Module Design and Its Performance Estimation for Dual X-ray Baggage Inspection System / K Kim, H. Y. Yeo, I. S. Jun // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2008. – V. 45 (5). P. 435–438.
76. Slavashevich, I. Optimization of Physico-Topological Parameters of Dual Energy X-ray Detectors Applied in Inspection Equipment / I. Slavashevich, D. Pozdnyakov, D. Kasiuk, V. Linev // *Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies*. – 2018. – V. 227. – P. 261–269.
77. Wells, K. A review of X-ray explosives detection techniques for checked baggage / K. Wells, D. A. Bradley // *Appl. Radiat. Isot.* – 2012. – V. 70. – № 8. – P. 1729–1746.
78. Schwaninger, A. The impact of image based factors and training on threat detection performance in X-ray screening / A. Schwaninger, A. Bolng, T. Halbherr, S. Helman, A. Belyavin, L. Hay // *Proc. 3rd Int. Conf. Res. Air Transp. (ICRAT)*. – 2008. – P. 317–324.
79. Bolng, A How image based factors and human factors contribute to threat detection performance in X-ray aviation security screening / A. Bolng, T. Halbherr, A. Schwaninger // *HCI and Usability for Education and Work (Lecture Notes in Computer Science)* A. Holzinger, Ed. Berlin, Germany: Springer. – 2008. – V. 5298. – P. 419–438.
80. Mery, D. Modern computer vision techniques for X-ray testing in baggage inspection / D. Mery, E. Svec, M. Arias, V. Riffo, J. M. Saavedra, S. Banerjee // *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Syst.* – 2016 – V. 47. – № 4. – P. 682–692.
81. Park, J. Design optimization of X-ray security scanner based on dual-energy transmission imaging with variable tube voltage / J. Park, G. An and H. Seo // *Journal of Instrumentation*. – 2023. – V. 18. – 1063.
82. Illicit, R. H. Material Detection using Dual-Energy X-Ray Images / R. H. Illicit // *The International Arab Journal of Information Technology*. – 2016. – V. 13. – № 4. – P. 409–416.

83. Wang, B. Detect occluded items in X-ray baggage inspection / B. Wang, Y. Tian, J. Wang, J. Hu, D. Liu, Z. Xu // *Computers & Graphics*. – 2023. – V. 115. – P. 148–157.
84. Wetter, O. E. Imaging in airport security: Past, present, future, and the link to forensic and clinical radiology / O. E. Wetter // *Journal of Forensic Radiology and Imaging*. – 2013. – V. 1. – № 4. – P. 152–160.
85. Han, J. C. Single-shot dual-energy x-ray imaging with a flat-panel sandwich detector for preclinical imaging / J. C. Han, H. K. Kim, D. W. Kim, S. Yun, H. Youn, S. Kam, J. Tanguay, I. A. Cunningham // *Current Applied Physics*. – 2014. – V. 14. – № 12. – P. 1734–1742.
86. Beuville, E. An application specific integrated circuit and data acquisition system for digital X-ray imaging // E. Beuville, B. Cederstroem, M. Danielsson, L. Luo, D. Nygren, E. Oltman, J. Vestlund // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 1998. – V. 406 (2). – P. 337–342.
87. Sones, R. A. Noise correlations in images acquired simultaneously with a dual-energy sandwich detector / R. A. Sones, G. T. Barnes // *Med. Phys.* – 1989. – V. 16. – P. 858–861.
88. Rebuffel, V. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits / V. Rebuffel, J. M. Dinten // *Insight-non-destructive testing and condition monitoring*. – 2007. – V. 49. – № 10. – P. 589–594.
89. Park, J.S. Calculation of effective atomic number and normal density using a source weighting method in a dual energy X-ray inspection system / J. S. Park, J. K. Kim // *Journal of the Korean physical society*. – 2011. – V. 59. – № 4. – P. 2709–2713.
90. Гавриш Ю.Н. Программный комплекс для восстановления интроскопических изображений с использованием метода дуальной энергии / Ю. Н. Гавриш, Я. А. Бердников, Д. О. Спиринов, А. Н. Передерий, М. В. Сафонов, И. В. Романов // *Problems of atomic science and technology*. – 2010. – V. 54. – № 3. – P. 123–125.

91. Gil, Y. Radiography simulation on single-shot dual-spectrum X-ray for cargo inspection system / Y. Gil, Y. Oh, M. Cho, W. Namkung // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2011. – V. 69. – № 2. – P. 389–393.
92. Заявка 2458408. Европейское патентное ведомство, МПК G01V 5/00. Dual-energy X-ray body scanning device and image processing method. Chen Xue Liang, Chen Li, Huo Mei Chun, Yang Li Rui, Dong Ming Wen, Kong Wei Wu, Yang XiaoYue, Xue Kai, Li Yong Qing, Li Guang Qing, Zhao Lei; BEIJING ZHONGDUN ANMIN ANALYSIS TECHNOLOGY CO LTD, FIRST RES INST OF MINISTRY OF PUBLIC SECURITY OF P R C. – № 11167491; заявл. 25.05.2011; опубл. 30.05.2012.
93. Удод, В.А. Оценка влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов методом дуальных энергий / В. А. Удод, С. П. Осипов, Я. Ван // *Дефектоскопия*. – 2018. – № 8. – С. 50–65.
94. Udod, V.A. The mathematical model of image, generated by scanning digital radiography system / V. A. Udod, S. P. Osipov, Y. Wang // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* : IOP Publishing. – 2017. – V. 168. – № 012042.
95. Rogers, T.W. A deep learning framework for the automated inspection of complex dual-energy x-ray cargo imagery / T. W. Rogers, N. Jaccard, L. D. Griffin // *International Society for Optics and Photonics*. – 2017. V. – 10187.
96. Roessl, E. Cramér–Rao lower bound of basis image noise in multiple-energy x-ray imaging / E. Roessl, C. Herrmann // *Phys. Med. and Biol.* – 2009. – V. 54. – №. 5. – P. 1307–1318.
97. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1978. – 832 с.
98. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука. – 1988. – 480 с.
99. X-ray mass attenuation coefficients. – URL : <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html> (дата обращения : 03.04.2024).

100. Udod, V. A. Mathematical Models of Radiation Transparency of Test Objects When Using Sandwich X-Ray Radiation Detectors / V. A. Udod, S. E. Vorobeichikov, S. Y. Nazarenko // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – V. 56. – № 2. – P. 161–170. [Удод, В.А. Математические модели радиационных прозрачностей объекта контроля при использовании сэндвич-детекторов рентгеновского излучения / В. А. Удод, С. Э. Воробейчиков, С. Ю. Назаренко // Дефектоскопия. – 2020. – № 2. – С. 31–41.].

101. Евстропьев, К. С. Химия кремния и физическая химия силикатов / К. С. Евстропьев. – М. : Промстройиздат, 1956. – 124 с.

102. Открытый обзор продукции российских производителей специальных средств и техники для обеспечения общественной безопасности: Научно-технический информационный сборник. Вып. 1. – М. : ФКУ НПО «СТиС» МВД России, 2018. – 103 с.

103. Udod, V. A. Algorithm for Evaluating Errors in Recognition of Materials in X-Ray Testing System Containing X-Ray Sandwich Detectors / V. A. Udod, S. P Osipov, S. Y. Nazarenko // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – V. 58. – № 1. – P. 46–56. [Удод, В. А. Алгоритм оценки погрешностей при распознавании материалов в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения / В. А. Удод, С. П. Осипов, С. Ю. Назаренко // Дефектоскопия. – 2022. – № 1. – С. 40–51.].

104. Liang, K. J. Toward automatic threat recognition for airport X-ray baggage screening with deep convolutional object detection / K. J. Liang, J. B. Sigman, G. P. Spell, D. Strellis, W. Chang, F. Liu, T. Mehta, L. Carin // arXiv preprint arXiv : 1912.06329. – 2019.

105. Xiong, T. Improved Adaptive Kalman-Median Filter for Line-Scan X-ray Transmission Image / T. Xiong, W. Ye // Sensors. – 2022. – V. 22. – № 13. – P. 4993.

106. Udod, V. A. Algorithm for Optimizing the Parameters of Sandwich X-ray Detectors / V. A. Udod, S. P Osipov, S. Y. Nazarenko // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2023. – V. 59. – № 3. – P. 359–373. [Удод, В. А. Алгоритм

оптимизации параметров сэндвич-детекторов рентгеновского излучения / В. А. Удод, С. П. Осипов, С. Ю. Назаренко // Дефектоскопия. – 2023.– № 3. – С. 44–58.].

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения в учебный процесс

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



АКТ


о внедрении результатов диссертационной работы
Назаренко Светланы Юрьевны
в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертации Назаренко Светланы Юрьевны «Распознавание материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий при использовании сэндвич-детекторов рентгеновского излучения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» используется в отделении «Контроль и диагностика» инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности при изучении дисциплин «Радиационные методы контроля» и «Радиационный контроль и диагностика» для подготовки бакалавров и магистров по направлениям 12.03.01, 12.04.01 «Приборостроение».

Заведующий кафедрой – руководитель
отделения на правах кафедры ОКД ИШНКБ,
д.ф.-м.н., профессор

Доцент ОКД ИШНКБ, к.т.н.

Доцент ОКД ИШНКБ, к.т.н.


А. П. Суржилов


И. В. Плотникова


Г. В. Вавилова