

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Назаренко Светлана Юрьевна

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель:

Удод Виктор Анатольевич

д.т.н, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, профессор кафедры информационных технологий и бизнес-аналитики

Официальные оппоненты:

Клопотов Анатолий Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры прикладной механики и материаловедения, г. Томск

Потрахов Николай Николаевич

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

Защита состоится «17» сентября 2024 года в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, корпус 18, ауд. 215.



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

Автореферат разослан «__» _____ 202__ г.

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



Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 МДЭ 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 др.

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 ССЦР с сэндвич-детекторами рассматривали Fredenberg E., Kim D.W., Youn H., Shaw C. C., Gur D. B и др.

Вопросам оценки ЭАН методом дуальных энергий с регистрацией рентгеновского излучения сэндвич-детекторами посвящены статьи Рыжикова В.Д., Найдёнова С.В., Ополонина А.Д., Neagu M., Mateiasi G., Li L., Zhang S., Russo P. Martz H.E. и др.

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

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

Сканирующая цифровая радиография с функцией распознавания материалов МДЭ является действенным методом обнаружения потенциально опасных фрагментов в багаже и ручной клади, так как позволяет оценить ЭАН материалов ОК и их структурных фрагментов, что существенно повышает уровень транспортной безопасности. Одновременная же оценка массы ОК и их фрагментов дополняют возможности анализируемых систем. Дальнейшие перспективы развития багажных ССЦР с функцией распознавания материалов МДЭ с регистрацией рентгеновского излучения сэндвич-детекторами заключаются в совершенствовании подходов к проектированию аппаратуры нового поколения на основе оптимального выбора параметров сэндвич-детекторов и максимальных энергий рентгеновского излучения. Реализация отмеченных перспектив невозможна без разработки математических и имитационных моделей анализируемых систем и 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.

Методологии 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 шумы, 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 объекта 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 проведен аналитический обзор современного состояния и перспективы развития систем досмотрового контроля,

используемые для досмотра багажа и ручной клади пассажиров, грузовых контейнеров с целью обеспечения безопасности перевозок и пресечения попыток нелегального провоза запрещенных предметов. Установлено, что среди различных типов систем, используемых для этой цели, наибольшее распространение в последние десятилетия получили ССЦР с сэндвич-детекторами излучения, которые представляют собой комбинации из первого и второго детекторов расположенных друг за другом по направлению падающего излучения и дополнительно разделены между собой фильтром, который устанавливается с целью усиления спектральных различий излучения, падающего на первый и второй детекторы.

Во второй главе разработана математическая модель радиационных прозрачностей (РП) объекта контроля (ОК) для сэндвич-детектора рентгеновского излучения.

Под РП ОК понимается отношение сигнала на выходе детектора при наличии ОК к сигналу на выходе детектора при отсутствии ОК.

Выражения для РП ОК d_1 , d_2 соответствующих первому и второму детекторам сэндвич-детектора излучения, имеют вид:

$$d_1 = \frac{B_1(H)}{B_1(0)} = d_{t1} + \Phi_1 \quad (1)$$

$$d_2 = \frac{B_2(H)}{B_2(0)} = d_{t2} + \Phi_2 \quad (2)$$

Здесь $B_1(H)$, $B_2(H)$ и $B_1(0)$, $B_2(0)$ – сигналы на выходе первого и второго детекторов при наличии и отсутствии ОК соответственно; d_{t1} и d_{t2} – теоретические РП ОК, соответствующие первому и второму детекторам соответственно; Φ_1 и Φ_2 – шумы РП ОК, обусловленные квантовой природой излучения, для первого и второго детектора соответственно.

Выражения для прозрачностей d_{t1} и d_{t2} в развернутой форме имеют вид:

$$d_{t1} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z) \rho H) \bar{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \bar{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE} \quad (3)$$

$$d_{t2} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z) \rho H - m(E, Z_1) \rho_1 H_1 - m(E, Z_f) \rho_f H_f) \bar{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_1) \rho_1 H_1 - m(E, Z_f) \rho_f H_f) \bar{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E) dE} \quad (4)$$

Здесь E_0 – максимальная энергия квантов испускаемых источником, МэВ; $g(E, E_0) = dN/dE$ – энергетический спектр рентгеновского излучения, создаваемого источником, по числу квантов, $1/(\text{МэВ} \cdot \text{с})$; $m(E, Z)$ – массовый коэффициент ослабления (МКО) излучения с энергией E для материала

ОК, см²/г; Z – атомный номер материала ОК; ρ – плотность материала ОК, г/(см³); $\bar{E}_{ab}(E)$ – среднее значение поглощенной энергии, соответствующее одному зарегистрированному кванту с энергией E , МэВ; ρH – массовая толщина ОК, г/(см²); $\varepsilon(E)$ – эффективность регистрации квантов излучения с энергией E детектором; 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 соответственно, см.

Средние значения и дисперсии шумов Φ_1 и Φ_2 соответственно равны:

$$\bar{\Phi}_1 = 0; \bar{\Phi}_2 = 0 \quad (5)$$

$$\sigma^2(\Phi_1) = \frac{\sigma^2[N_1(H)]}{[\bar{B}_1(0)]^2} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) \overline{E_{ab1}^2}(E) \varepsilon_1(E) dE}{C_{id} \left[\int_0^{E_0} g(E, E_0) \bar{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE \right]^2} \quad (6)$$

$$\sigma^2(\Phi_2) = \frac{\sigma^2[N_2(H)]}{[\bar{B}_2(0)]^2} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) e^{-m(E, Z)\rho H - m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f} \overline{E_{ab2}^2}(E) \varepsilon_2(E) dE}{C_{id} \left[\int_0^{E_0} g(E, E_0) e^{-m(E, Z_1)\rho_1 H_1 - m(E, Z_f)\rho_f H_f} \bar{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E) dE \right]^2} \quad (7)$$

Здесь C_{id} – обобщенный параметр системы контроля, характеризующий источник и сэндвич-детектор излучения; $\overline{E_{ab1}^2}(E)$, $\overline{E_{ab2}^2}(E)$ – средние квадраты поглощенной энергии для одного зарегистрированного кванта с энергией E для первого и второго детекторов соответственно, МэВ².

Совокупность формул (1)–(7) представляет собой математическую модель РП ОК для сэндвич-детектора излучения. Она может быть использована для решения круга задач, связанных с исследованием МДЭ применительно к рентгеновским сканирующим системам неразрушающего контроля, содержащим линейку сэндвич-детекторов.

Получена аналитическая оценка коэффициента корреляции выходных сигналов $B_1(H)$ и $B_2(H)$ сэндвич-детектора излучения, которая имеет следующий вид (в предположении, что второй детектор в сэндвич-детекторе является детектором полного поглощения):

$$r[B_1(H), B_2(H)] = \frac{\bar{B}_2(H)}{\bar{B}_0(H) - \bar{B}_1(H)} \left\{ \frac{\bar{B}_1(H)}{\bar{B}_0(H)} \sigma^2[B_0(H)] - \sigma^2[B_1(H)] \right\} \quad (8)$$

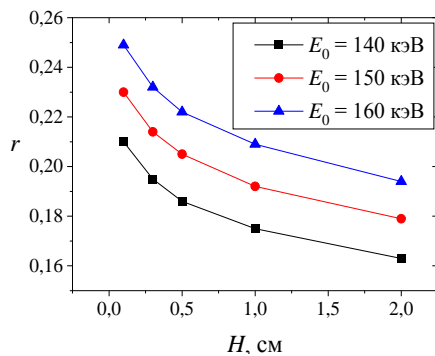
$$\sigma[B_1(H)] \sigma[B_2(H)]$$

Здесь $B_0(H)$ – сигнал на выходе идеального детектора излучения, под которым подразумевается гипотетический детектор полного поглощения, у

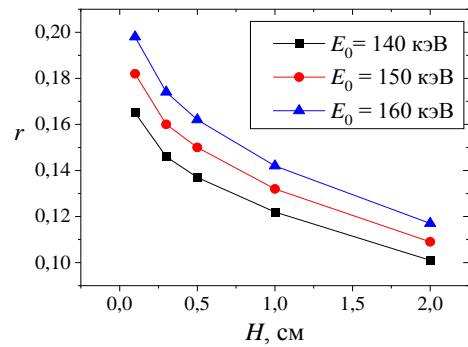
которого геометрические размеры и расположение идентичны первому (переднему) детектору излучения.

Установлено, что коэффициент корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора излучения монотонно уменьшается как с ростом ЭАН материала ОК, так и его толщины (рис. 1). Это обусловлено ужесточением пучка излучения, вследствие чего он становится статистически более однородным.

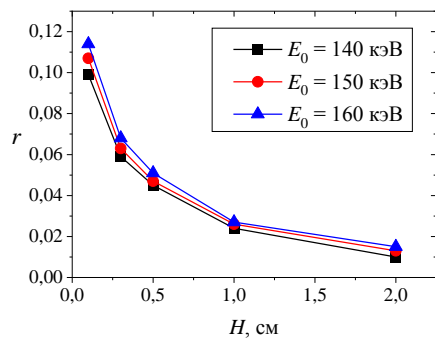
Из этих результатов следует, что для широкого диапазона тестовых объектов и разных значений максимальной энергии в спектре рентгеновского излучения коэффициент корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора излучения имеет достаточно низкое значение (не превышает 0,3). Это позволило при последующем статистическом моделировании РП ОК исходить из предположения, что указанные сигналы являются независимыми случайными величинами.



a



б



в

Рис. 1 – Коэффициент корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора излучения с параметрами $H_f = 0,7$ мм, $H_1 = 0,3$ мм, $Z_1 = 54$ (CsI):

a – углерод, *б* – алюминий, *в* – железо

В третье главе разработан алгоритм оценки погрешностей измерения ЭАН материала ОК методом дуальных энергий при регистрации рентгеновского излучения сэндвич-детекторами.

Приведен пример его использования для ССЦР с сэндвич-детекторами излучения со следующими параметрами: первый детектор из иодида цезия толщиной 0,3 мм; промежуточный фильтр в форме пластины

из меди толщиной 0,7 мм; второй детектор из иодида цезия толщиной 5 мм, максимальная энергия рентгеновского излучения 160 кэВ. Предварительные расчеты показали, что эффективность регистрации квантов излучения в диапазоне энергий от 0 до 125 кэВ для второго детектора – 5 мм CsI составляет не менее 95 % и это значение плавно уменьшается до 81 % в диапазоне энергий от 130 до 160 кэВ. Поэтому для моделирования предполагалось, что второй детектор является детектором полного поглощения.

В качестве тестовых материалов были выбраны углерод (С), алюминий (Al) и железо (Fe).

Для каждого тестового ОК рассчитывались среднее значение Z_m , среднеквадратическая m_z и относительная среднеквадратическая δ_z погрешности оценки атомного номера Z_t его материала:

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

Здесь Z_i – оценка параметра Z_t , полученная в результате i -го моделирования ($i = 1, 2, \dots, 10000$).

Соответствующие результаты для среднеквадратической погрешности m_z в зависимости от базовых значений $\sigma_b(\Phi_2)$ СКО представлены на рис. 2.

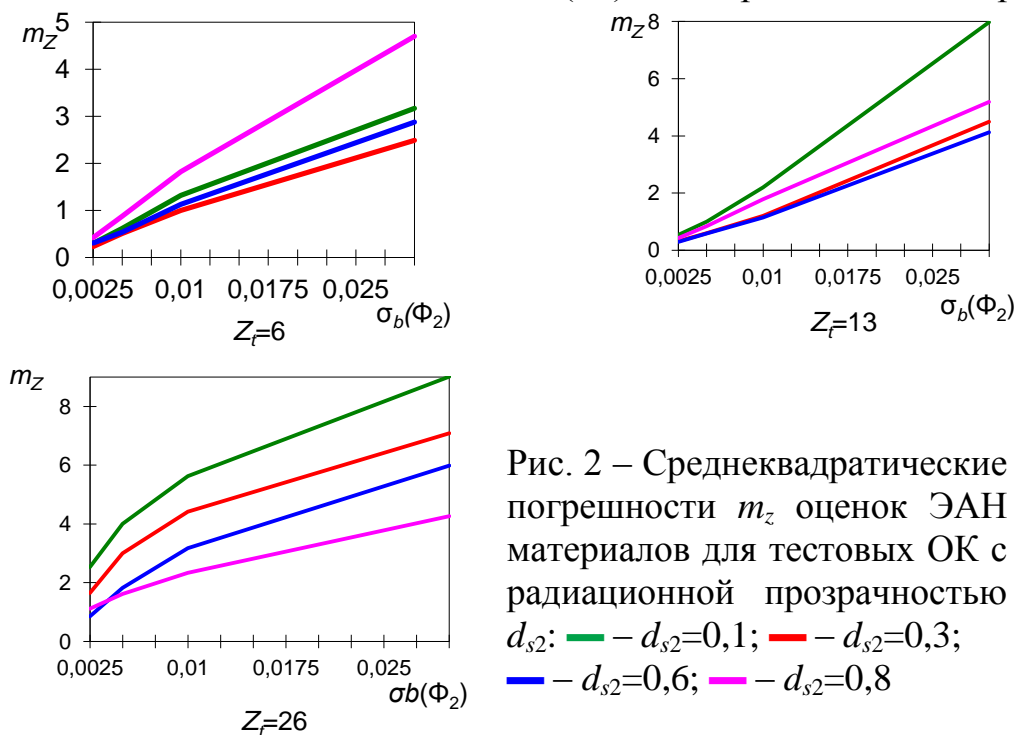


Рис. 2 – Среднеквадратические погрешности m_z оценок ЭАН материалов для тестовых ОК с радиационной прозрачностью d_{s2} : — $d_{s2}=0,1$; — $d_{s2}=0,3$; — $d_{s2}=0,6$; — $d_{s2}=0,8$

Из этих результатов следует, что погрешность оценки атомного номера для разных материалов имеет сильную зависимость от шумов, обусловленных квантовой природой рентгеновского излучения. Вместе с тем указанная погрешность:

– строго возрастает при возрастании уровней шумов (что естественно и вполне закономерно);

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

– для ОК из материала со средним (алюминий) или высоким значением (железо) атомного номера имеет максимальное значение при максимальной массовой толщине ОК, что равносильно минимальному значению РП ОК;

– увеличивается при увеличении атомного номера материала ОК.

В четвертой главе разработан алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов излучения по критерию минимума максимальной относительной погрешности оценки ЭАН материалов объектов контроля методом дуальных энергий, порождаемой квантовой природой рентгеновского излучения.

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 окисульфида гадолиния, либо из селенида цинка (табл. 1). 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.

Табл. 1 – Оптимальные значения параметров сэндвич-детекторов излучения

Сцинтиллятор первого детектора	$H_{1\text{opt}}$, мм	$H_{f\text{opt}}$, мм
CsI	0,2	0,3
Gd ₂ O ₂ S	0,2	0,5
ZnSe	0,5	0,5

Проведено сравнение, представленных в табл. 1 полученных нами результатов с результатами других авторов.

С использованием разработанного алгоритма была также решена и задача оптимального выбора значения параметра Z_1 (ЭАН материала сцинтиллятора первого детектора). При этом для ее решения был применен 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 , последний из которых определяется равенством

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

и представляет собой относительное среднеквадратическое отклонение энергии, регистрируемой идеальным детектором за фиксированный промежуток времени T при отсутствии ОК. В табл. 2 приведены указанные промежутки согласно полученным результатам моделирования.

Табл. 2 – 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]

Для удобства проведения процедуры сравнения данных промежутков через $Q(\sigma_0, \text{CsI})$ был обозначен промежуток $Q(\sigma_0)$, соответствующий материалу сцинтиллятора первых детекторов из иодида цезия. Аналогично этому были использованы обозначения $Q(\sigma_0, \text{Gd}_2\text{O}_2\text{S})$ и $Q(\sigma_0, \text{ZnSe})$ для тех случаев, когда материалами сцинтилляторов 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 было 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 осуществлялось 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 итоге, в результате проведенного сравнения вышеописанных промежутков, было получено, что лучшим материалом для сцинтиллятора первых детекторов (среди трех рассматриваемых) является селенид цинка

(ZnSe). Далее по степени предпочтения (оптимальности) следует иодида цезия (CsI), а за ним – оксисульфид гадолиния (Gd_2O_2S). Отсюда, с учетом (табл. 1), окончательно получаем:

$$Z_{1opt} = 32(\text{ZnSe}); H_{1opt} = 0,5 \text{ мм}, H_{fopt} = 0,5 \text{ мм}. \quad (9)$$

Таким образом, предложенный нами алгоритм позволил получить значения параметров сэндвич-детекторов излучения (формула (9)), которые являются оптимальными при распознавании материалов с ЭАН равным 7.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ, Scopus и Web of science

1. 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].

2. 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.].

3. Udod, V. X-ray Inspection Systems with Sandwich Radiation Detectors: A Survey / V. Udod, S. Nazarenko // Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. – Cham : Springer International Publishing. – 2022. – P. 11–18.

4. 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.].

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

Тезисы докладов

6. Назаренко, С. Ю. Исследование зависимости между выходными сигналами сэндвич-детектора рентгеновского излучения / С. Ю. Назаренко, В. А. Удод // SIBTEST - 2019 : Сборник тезисов докладов V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле, Екатеринбург, 26–28 июня 2019 года. – Екатеринбург: Изд-во ТПУ, 2018, 2019. – С. 48–49.

7. Назаренко, С. Ю. Распознавание материалов методом дуальных энергий в системе досмотрового контроля с сэндвич-детекторами // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов X Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 9–11 ноября 2021 г., г. Томск. – Томский политехнический университет, 2021. – С. 90.

8. Назаренко, С. Ю. Современное состояние систем досмотрового контроля с сэндвич-детекторами / С. Ю. Назаренко // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов XI Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 7–10 ноября 2022 г., г. Томск. – Томский политехнический университет, 2022. – С. 60.

9. Назаренко, С. Ю. Оценка коэффициента корреляции выходных сигналов сэндвич-детектора для различных тестовых объектов контроля / С. Ю. Назаренко // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов XII Международной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых, 7–10 ноября 2023 г., г. Томск. – Томский политехнический университет, 2023. – С. 106.