

На правах рукописи

Ван Яньчжао

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КВАНТОВЫХ ШУМОВ НА КАЧЕСТВО
РАСПОЗНАВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ
ЭНЕРГИЙ ПРИ ДОСМОТРОВОМ КОНТРОЛЕ ОБЪЕКТОВ**

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2018

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Удод Виктор Анатольевич

Официальные оппоненты: **Косарина Екатерина Ивановна**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» государственный научный центр Российской Федерации, главный научный сотрудник лаборатории неразрушающих методов контроля, г. Москва
Солодушкин Андрей Иванович, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, научный сотрудник лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля, г. Томск

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры» им Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «04» декабря 2018 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.269.09

к.т.н., доцент



Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Радиационные методы неразрушающего контроля и диагностики на современном этапе своего развития являются высокоразвитым научно-техническим направлением, охватывающим разнообразные сферы жизнедеятельности человека – промышленность, медицину, досмотр (с целью обеспечения безопасности пассажирских и грузовых перевозок) и т.д.

Для проведения досмотра, а также для дефектоскопии и диагностики материалов и изделий на сегодняшний день широко используются, а во многих случаях и явно преобладают по частоте применения, многоканальные сканирующие системы цифровой рентгенографии (МССЦР). Принцип действия данных систем состоит в том, что объект контроля (ОК) в процессе своего перемещения просвечивается веерным пучком излучения, а прошедшее через ОК излучение регистрируется линейкой детекторов.

В ряде задач досмотрового контроля возникает необходимость распознавания материала ОК с целью выявления его принадлежности к классу объектов, перемещение которых запрещено или строго регламентировано.

Требуемая эффективность досмотрового контроля во многих случаях достигается посредством применения специализированных физических методов. Одним из них в настоящее время является метод дуальных энергий (МДЭ). Сущность этого метода состоит в том, что ОК подвергается просвечиванию дважды – при двух разных напряжениях на рентгеновской трубке, а результаты регистрации излучения обрабатываются по определенному алгоритму для получения оценки атомного номера (либо эффективного атомного номера) материала ОК, на основании которой принимается решение об опасности (либо неопасности) ОК. Существуют различные модификации в реализации данного метода, например, – однократное просвечивание ОК при одновременной регистрации излучения

двумя детекторами, которые располагаются друг за другом по ходу рентгеновских лучей, или использование вместо рентгеновских аппаратов высокоэнергетических источников тормозного излучения (линейные ускорители и бетатроны).

Вполне очевидно, что совершенствование МДЭ позволит увеличить надежность обнаружения с использованием МССЦР запрещенных предметов в ОК, а значит – повысить уровень безопасности, что, несомненно, является весьма актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Исследованию реализаций МДЭ, основанных на декомпозиции массового (либо линейного) коэффициента ослабления излучения на составляющие, соответствующие фотоэффекту и эффекту Комптона, посвящены работы Lehman L.A., Alvarez R.E., Macovski A., Brody W.R., Pelc N.J., Riederer S.J. Hall A.L., S. Chang, H. K. Lee, G. Cho, Zhengrong Ying, Ram Naidu, Carl R. Crawford и др.

Исследованию реализаций МДЭ, основанных на декомпозиции массового (либо линейного) коэффициента ослабления излучения на составляющие, соответствующие коэффициентам ослабления излучения для двух выбранных (базисных) материалов, посвящены работы S. Chang, H. K. Lee, G. Cho и др.

Исследованию высокоэнергетических реализаций МДЭ, основанных на построении таблиц соответствия между параметрами объекта (атомный номер и массовая толщина) и его радиационными прозрачностями для низкой и высокой максимальных энергиях, посвящены работы Огородникова С.А., Петрунина В.И., Гавриша Ю.Н., Бердникова Я.А., Спирина Д.О., Передерия А.Н., Сафонова М.В., И.В. Романова И.В 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. и др.

Исследованию неоднозначности распознавания материалов по атомному номеру высокоэнергетическим МДЭ (на основе линейных ускорителей электронов или бетатронов) посвящены работы Sanjeevareddy Kolkoori, Norma Wrobel, Andreas Deresch, Bernhard Redmer, Uwe Ewert, Спирина Д.О., Бердникова А.Я., Маркова С.И., Сафонова А.С, Ишханова Б.С., Курилика А.С., Руденко Д.С., Стопани К.А., Шведунова В.И. и др.

Исследованию проблематики оценки эффективного атомного номера материала многокомпонентного объекта посвящены работы Park J.S., Kim J.K., Alves H., Lima I., Lopes R.T., Anne Bonnin, Philippe Duvauchelle, Valérie Kaftandjian, Pascal Ponard., Taylor M.L., Smith R.L., Dossing F., Franich R.D., Горшкова В.А. и др.

Качество распознавания материалов методом дуальных энергий определяется большой совокупностью разнообразных факторов, среди которых одним из наиболее существенных является наличие статистических флуктуаций результатов регистрации излучения, обусловленных квантовой природой излучения (квантовые шумы). Несмотря на отдельные значимые результаты различных авторов, исследовавших в той или иной степени влияние квантовых шумов на точность определения атомного номера материала ОК с помощью МДЭ, на сегодняшний день в научной литературе не представлен детально описанный алгоритм для оценки такого влияния. Разработка такого алгоритма является весьма важной задачей, неразрывно связанной с созданием более эффективных систем рентгеновского досмотрового контроля и с разработкой обоснованных правил их практического применения.

Объект исследования – МССЦР для досмотрового контроля объектов.

Предмет исследования – распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов с использованием МССЦР.

Цель работы – количественная оценка влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов методом дуальных энергий при досмотровом контроле с использованием МССЦР.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

1. Разработать математическую модель изображения, сформированного МССЦР, которая учитывает трансформацию энергетического спектра рентгеновского излучения объектом контроля и шум, обусловленный квантовой природой излучения.
2. Провести сравнительный анализ различных определений понятия эффективного атомного номера материала многокомпонентного объекта.
3. Разработать математическую модель радиационной прозрачности объекта контроля с учётом квантового шума.
4. Разработать алгоритм статистической оценки влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель изображения, сформированного МССЦР, которая учитывает трансформацию энергетического спектра рентгеновского излучения объектом контроля и шум, обусловленный квантовой природой излучения.
2. Разработана математическая модель радиационной прозрачности объекта контроля с учётом квантового шума.
3. Предложено понятие множества допустимых решений для метода дуальных энергий, которое учитывают технические возможности системы досмотрового контроля и ее назначение.
4. Разработан алгоритм статистической оценки влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного алгоритма для оценки потенциальной точности метода дуальных энергий, определяемой квантовыми шумами, при распознавании материалов контролируемых объектов с использованием МССЦР.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы: методы решения систем интегрально-параметрических уравнений; методы теории вероятностей и математической статистики; методы математического моделирования; методы обработки экспериментальных данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель изображения, сформированного МССЦР, которая учитывает немонотонность рентгеновского излучения и квантовый шум.
2. Формальные определения понятия эффективного атомного номера применительно к материалу многокомпонентного объекта с известной массовой толщиной для случаев его однократного или двукратного просвечивания немонотонным излучением.
3. Математическая модель экспериментальной радиационной прозрачности объекта контроля.
4. Понятие множества допустимых решений для метода дуальных энергий с использованием нижних и верхних порогов, устанавливаемых для эффективного атомного номера распознаваемых материалов и их радиационных прозрачностей.
5. Алгоритм статистической оценки влияния шумов, обусловленных квантовой природой излучения, на качество распознавания материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов обеспечена корректным использованием математического аппарата и основных положений взаимодействия рентгеновского излучения с веществом,

а также их согласованностью с экспериментальными данными и результатами, полученными другими исследователями. В процессе расчетов и анализа математических зависимостей применялось сертифицированное программное обеспечение, позволяющее обрабатывать информацию.

Личный вклад автора заключается: в разработке математической модели изображения, сформированного МССЦР, с учетом немонотонности рентгеновского излучения и квантового шума; в формальных определениях понятия эффективного атомного номера применительно к материалу многокомпонентного объекта с известной массовой толщиной для случаев его однократного или двукратного просвечивания немонотонным излучением.; в разработке математической модели радиационной прозрачности объекта контроля с учётом квантового шума и обработке экспериментальных данных с целью ее проверки; в предложенном понятии множества допустимых решений для метода дуальных энергий; в разработке алгоритма статистической оценки влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий; в проведении математического моделирования с целью апробации разработанного алгоритма применительно к досмотровому контролю с использованием МССЦР.

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 ИШНКБ ТПУ; в «МИРЭА – Российский технологический университет» в инженерно-научном производственном центре «Средства неразрушающего контроля» в рентгеновской установке для досмотрового контроля легковых автомобилей и микроавтобусов, снабженной функцией распознавания материалов методом дуальных энергий.

Апробация работы. Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

- 1) V Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» 25-29 мая 2015, г. Томск.
- 2) III Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 27-31 июля 2015, Горный Алтай, п. Катунь.
- 3) VI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» 23-27 мая 2016, г. Томск.
- 4) V Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» 3-8 октября 2016, г. Томск.
- 5) V Международный молодежный Форум 'Инженерия для освоения космоса' 18-20 апреля 2017, г. Томск.
- 6) IV Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 28-30 июня 2017, г. Новосибирск.
- 7) VI Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» 9-14 октября 2017, г. Томск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из которых 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, 3 статьи, индексируемые в SCOPUS, и 5 статей в сборниках трудов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, включающего

149 источников. Объем диссертации составляет 166 страниц машинописного текста, 28 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дана общая характеристика выполненной работы.

В первой главе проведен литературный обзор современного состояния и опыта практического применения систем цифровой рентгенографии различных типов, предназначенных для дефектоскопии, диагностики и досмотрового контроля объектов, и описаны основные направления их развития. Установлено, что в настоящее время одними из активно развивающихся систем данного вида являются МССЦР. Отмечено, что для повышения надежности обнаружения инородных (несанкционированных) включений в досматриваемых объектах с использованием МССЦР необходимо дальнейшее совершенствование методов идентификации веществ (методов дуальных энергий и их различных обобщающих модификаций). Исходя из этого, и были сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлен обзор современного состояния, опыта практического применения и направлений дальнейшего совершенствования МДЭ в системах цифровой рентгенографии, предназначенных для дефектоскопии и досмотрового контроля объектов.

Теоретической основой для оценки эффективного атомного номера материала ОК с использованием МДЭ является система уравнений вида:

$$\frac{\int_0^{E_1} g(E, E_1) \exp(-m(E, Z) \rho H) \overline{E_{ab}(E)} \epsilon(E) dE}{\int_0^{E_1} g(E, E_1) \overline{E_{ab}(E)} \epsilon(E) dE} = d_1; \quad (1)$$

$$\frac{\int_0^{E_2} g(E, E_2) \exp(-m(E, Z) \rho H) \overline{E_{ab}(E)} \varepsilon(E) dE}{\int_0^{E_2} g(E, E_2) \overline{E_{ab}(E)} \varepsilon(E) dE} = d_2. \quad (2)$$

Здесь $g(E, E_1)$, $g(E, E_2)$ – энергетические спектры рентгеновского излучения по числу квантов при максимальных энергиях E_1 и E_2 , соответственно, $1/(\text{МэВ} \cdot \text{с})$; $m(E, Z)$ – массовый коэффициент ослабления (МКО) излучения для материала ОК, $\text{см}^2/\text{г}$; Z – атомный номер материала ОК; ρ – плотность ОК, $\text{г}/\text{см}^3$; ρH – массовая толщина ОК, $\text{г}/\text{см}^2$; $\overline{E_{ab}(E)}$ – среднее значение поглощенной детектором энергии для одного зарегистрированного им кванта с энергией E , МэВ; $\varepsilon(E)$ – эффективность регистрации квантов излучения с энергией E детектором в пределах его апертуры; левые части уравнений (1), (2) – теоретические радиационные прозрачности ОК для максимальных энергий E_1 и E_2 , соответственно; d_1 , d_2 – экспериментальные радиационные прозрачности ОК для максимальных энергий E_1 , E_2 , соответственно.

Атомный номер Z материала ОК и его массовая толщина ρH находятся из системы уравнений (1), (2). При этом решение данной системы может быть найдено методом наименьших квадратов. То есть в качестве решения принимаются такие значения Z и ρH , которые минимизируют функцию – сумму квадратов отклонений между теоретическими $d_{t1}(Z, \rho H)$, $d_{t2}(Z, \rho H)$ и экспериментальными d_1 , d_2 радиационными прозрачностью ОК.

Установлено, что среди многообразных факторов, определяющих точность оценки атомного номера (эффективного атомного номера) материала ОК с помощью МДЭ, одними из основных являются квантовые шумы (статистические флуктуации результатов регистрации излучения), характеризующие точность измерения экспериментальных радиационных прозрачностей ОК при низкой E_1 и высокой E_2 максимальных энергиях, соответственно.

В третьей главе проведен сравнительный анализ различных определений понятия эффективного атомного номера материала многокомпонентного объекта.

Для случая использования немоноэнергетического излучения предложено формально определить эффективный атомный номер Z_{eff} материала многокомпонентного объекта с известной массовой толщиной $\rho_c H_c$ как решение относительно Z уравнения

$$\int_0^{E_0} f_n(E, E_0) \exp(-m_c(E) \rho_c H_c) dE = \int_0^{E_0} f_n(E, E_0) \exp(-m(E, Z) \rho H) dE \quad (3)$$

при условии

$$\rho_c H_c = \rho H. \quad (4)$$

Здесь

$$f_n(E, E_0) = \frac{g(E, E_0) \varepsilon(E) \overline{E_{\text{ab}}(E)}}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \varepsilon(E) \overline{E_{\text{ab}}(E)} dE}$$

— нормированный (по площади на 1) энергетический спектр излучения, регистрируемого детектором, с максимальной энергией E_0 ; ρ_c , H_c — плотность (средняя) и толщина многокомпонентного объекта соответственно; ρ , H — плотность и толщина условного одноэлементного объекта соответственно; $m_c(E) = \sum_{i=1}^n c_i m(E, Z_i)$ — МКО излучения квантов с энергией E для материала многокомпонентного объекта; $m(E, Z_i)$ — МКО излучения квантов с энергией E для материала i -го элемента с атомным номером Z_i , входящего в состав многокомпонентного объекта; n — число элементов в многокомпонентном объекте; c_i — массовая доля i -го элемента.

На содержательном уровне формула (3) представляет собой равенство радиационных прозрачностей многокомпонентного и условного одноэлементного объектов.

В случае просвечивания многокомпонентного объекта с известной массовой толщиной $\rho_c H_c$ двумя потоками рентгеновского излучения с низкой

E_1 и высокой E_2 максимальными энергиями предложено формально определить эффективный атомный номер его материала как решение относительно Z уравнения вида

$$\frac{\ln \int_0^{E_1} f_n(E, E_1) \exp(-m_c(E) \rho_c H_c) dE}{\ln \int_0^{E_2} f_n(E, E_2) \exp(-m_c(E) \rho_c H_c) dE} = \frac{\ln \int_0^{E_1} f_n(E, E_1) \exp(-m(E, Z) \rho H) dE}{\ln \int_0^{E_2} f_n(E, E_2) \exp(-m(E, Z) \rho H) dE}$$

при условии (4).

Проведенные численные расчеты для ряда многокомпонентных объектов при максимальных энергиях излучения 80 и 160 кэВ показали, что предложенные формулы для определения Z_{eff} хорошо согласуются с результатами вычислений данного параметра по «основной» формуле (широко используемой для вычисления Z_{eff} без учета излучения в явной форме)

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[k]{\sum_{i=1}^n c_i Z_i^k},$$

где показатель степени k равен 2,94.

В четвертой главе разработана математическая модель изображения, сформированного МССЦР. Модель учитывает трансформацию энергетического спектра рентгеновского излучения объектом контроля и шум, обусловленный квантовой природой излучения, а именно:

$$\mathbf{B} = \bar{\mathbf{B}} + \mathbf{N}.$$

Здесь $\mathbf{B}$ – первичное цифровое изображение, сформированное МССЦР, представляющее собой матрицу, состоящую из M строк и K столбцов. Число столбцов K совпадает с числом детекторов (измерительных каналов) в линейке.

Элементы матрицы $\bar{\mathbf{B}}$ равны соответствующим средним значениям радиометрических сигналов, а элементы матрицы $\mathbf{N}$ характеризуют шум в изображении.

Выражение для элементов матрицы $\bar{\mathbf{B}}$ имеет вид

$$\overline{B}_{mk} = A_{mk} \lambda_{mk} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt ,$$

где A_{mk} – среднее значение амплитуд электрических импульсов (электрических зарядов, Кл) с выхода k -го детектора излучения из линейки для m -ой строки изображения; λ_{mk} – интенсивность потока электрических импульсов с выхода k -го детектора в момент времени t_m , 1/с; $t_m = m \Delta t$, где Δt – шаг дискретизации (во времени) выходного процесса с детектора аналого-цифровым преобразователем; $\varphi(t)$ – импульсный отклик временного интегратора.

При использовании в МССЦР идеальных интеграторов со сбросом импульсный отклик $\varphi(t)$ описывается ступенчатой функцией

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T; \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где T – постоянная времени интегратора (время измерения излучения). Соответственно при этом $\Delta t = T$.

Значения A_{mk} связаны со средним значением поглощенной k -ым детектором энергии зарегистрированного им кванта излучения $\overline{E}_{mk}^{ab}$, МэВ соотношением

$$A_{mk} = \gamma_c \overline{E}_{mk}^{ab} ,$$

здесь γ_c – коэффициент преобразования поглощенной энергии рентгеновского излучения в электрический заряд, Кл/МэВ.

Зависимость $\overline{E}_{mk}^{ab}$ от параметров ОК, источника рентгеновского излучения с максимальной энергией E_0 и k -го детектора имеет вид

$$\overline{E}_{mk}^{ab} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-\mu(E) H_{mk}) \overline{E}_{ab}(E) \varepsilon(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-\mu(E) H_{mk}) \varepsilon(E) dE} , \quad (5)$$

где $g(E, E_0)$ – энергетический спектр источника излучения по числу квантов при максимальной энергии E_0 , 1/(МэВ · с); $\mu(E)$ – линейный коэффициент ослабления (ЛКО) квантов излучения с энергией E для материала ОК; H_{mk} –

лучевой размер ОК по линии, соединяющей центр излучателя и центр аперттуры k -го детектора на m -ом шаге регистрации излучения, т.е. в момент времени t_m (при использовании идеальных интеграторов со сбросом $t_m = mT$).

Интенсивность потока λ_{mk} вычисляется с помощью формулы

$$\lambda_{mk} = \frac{\psi(\theta_k)}{|\mathbf{r}_k|^2} S \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-\mu(E)H_{mk}) \varepsilon(E) dE,$$

где θ_k – угол между осью Oz (осью симметрии пучка излучения) и вектором $\mathbf{\Omega}_k$ – направлением луча из центра источника на центр k -го детектора линейки; θ – угол между осью Oz и направлением вылета квантов; $\Psi(\theta)$ – угловое распределение излучения, которое считается нормированным на 1 квант в телесный угол 4π (для изотропного источника $\psi(\theta) = \frac{1}{4\pi}$); $\mathbf{r}_k$ – радиус-вектор центра аперттуры k -го детектора; S – площадь аперттуры отдельного детектора из линейки.

Элементы N_{mk} матрицы $\mathbf{N}$ характеризуют шум, обусловленный квантовой природой излучения. Их среднее значение, ковариация и дисперсия соответственно равны:

$$\overline{N_{mk}} = 0; \quad \overline{N_{mk} N_{ij}} = \begin{cases} 0, & j \neq k, \\ \overline{A_{mk}^2} \lambda_{mk} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) \varphi(t + |m-i|\Delta t) dt, & j = k; \end{cases} \quad \sigma^2[N_{mk}] = \overline{A_{mk}^2} \lambda_{mk} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^2(t) dt.$$

Среднее значение квадрата амплитуд электрических импульсов с выхода k -го детектора $\overline{A_{mk}^2}$ связано со средним значением квадрата поглощенной k -ым детектором энергии для одного зарегистрированного им кванта излучения $\overline{E_{mk}^{ab^2}}$, МэВ² соотношением

$$\overline{A_{mk}^2} = \gamma_c^2 \overline{E_{mk}^{ab^2}}.$$

Значение $\overline{E_{mk}^{ab^2}}$ вычисляется аналогично выражению (5):

$$\overline{E_{mk}^{ab^2}} = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-\mu(E)H_{mk}) \overline{E_{ab}^2} \varepsilon(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-\mu(E)H_{mk}) \varepsilon(E) dE},$$

где $\overline{E_{ab}^2}(E)$ – средний квадрат поглощенной отдельным детектором энергии для одного зарегистрированного им кванта с энергией E , МэВ².

Приведен пример расчета параметров разработанной математической модели изображения, сформированного МССЦР. На основе этой модели была разработана математическая модель радиационной прозрачности ОК с учётом квантового шума:

$$d = d_t + \Phi, \quad (6)$$

где

$$d_t = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-\mu(E)H) \overline{E_{ab}}(E) \epsilon(E) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \overline{E_{ab}}(E) \epsilon(E) dE} \quad (7)$$

– среднее значение (математическое ожидание) радиационной прозрачности ОК; Φ – шум радиационной прозрачности ОК, обусловленный квантовой природой излучения, среднее значение (математическое ожидание) которого и дисперсия соответственно равны:

$$\begin{aligned} \overline{\Phi} &= 0; \\ \sigma^2(\Phi) &= \frac{F^2 \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-\mu(E)H) \overline{E_{ab}^2}(E) \epsilon(E) dE}{\psi(\Omega_{\text{det}}) ST \left[\int_0^{E_0} g(E, E_0) \overline{E_{ab}}(E) \epsilon(E) dE \right]^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Величины d и d_t в (6) можно интерпретировать как экспериментальную и теоретическую радиационные прозрачности ОК, соответственно.

С целью проверки адекватности разработанной математической модели радиационной прозрачности ОК с учётом квантового шума были проведены экспериментальные исследования на инспекционно-досмотровом комплексе Томского политехнического университета. В данном комплексе в качестве источника излучения применяется бетатрон с максимальной энергией $E_0 = 9$ МэВ, а в качестве детекторов излучения – сцинтилляционные кристаллы из вольфрамата кадмия (CdWO_4). Кристаллы имеют поперечные размеры 4

мм*6 мм и длину 35 мм (размер в направлении падающего излучения). Фокусное расстояние, т.е. расстояние от источника до вертикальной линейки детекторов (с использованием которой и проводились эксперименты), составляет 4,2 м. Формирование отдельного отсчета радиометрического сигнала осуществлялось по одному импульсу излучения бетатрона.

Тестовые объекты представляли собой образцы из железа и алюминия разной толщины. Максимальная энергия излучения бетатрона устанавливалась равной 5,5; 8,5 и 9 МэВ. Формулы (7) и (8) были преобразованы к эквивалентному виду, содержащему вместо энергетического спектра по числу квантов энергетический спектр интенсивности излучения, описываемый формулой Шиффа.

Расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами не превысило 9,6 % и 14,3 % для оценок математических ожиданий и СКО радиационных прозрачностей тестовых ОК, соответственно. Такие значения расхождений являются сравнительно небольшими, что позволяет признать разработанную математическую модель радиационной прозрачности ОК с учетом квантового шума вполне адекватной.

Предложено понятие множества допустимых решений для метода дуальных энергий, которое учитывают технические возможности системы досмотрового контроля и ее назначение

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

Здесь $Z_{\min}$, $Z_{\max}$ – нижний и верхний пороги эффективного атомного номера распознаваемых материалов, соответственно; $d_{\min}$, $d_{\max}$ – нижний и верхний пороги радиационной прозрачности ОК, соответственно.

Конкретные значения параметров $Z_{\min}$, $Z_{\max}$ и $d_{\min}$, $d_{\max}$ определяются отдельно для каждой индивидуальной реализации системы досмотрового радиационного контроля, а сама процедура принятия решения относительно досматриваемого ОК с помощью МДЭ при этом выглядит так:

- если $d_1 < d_{\min}$, то ОК признается потенциально опасным и его содержимое подлежит визуальному досмотру оператором;
- если $d_2 > d_{\max}$, то ОК признается неопасным вследствие его малой массовой толщины, которая находится, например, за порогом чувствительности системы контроля;
- если $d_{\min} \leq d_1 < d_2 \leq d_{\max}$, то определяется эффективный атомный номер материала ОК методом дуальных энергий, на основании чего принимается решение об опасности или безопасности ОК.

Разработан алгоритм статистической оценки влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий. Приведен пример его использования для системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с максимальными энергиями рентгеновского излучения 80 и 160 кэВ в случае применения детекторов полного поглощения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен аналитический обзор современного состояния и направлений развития систем цифровой рентгенографии, используемых для дефектоскопии, диагностики и досмотрового контроля объектов, в результате которого было, в частности установлено, что к числу наиболее перспективных систем данного вида относятся МССЦР.

2. Для повышения надежности обнаружения инородных (несанкционированных) включений в ОК необходимо дальнейшее развитие методов идентификации веществ (методов дуальных энергий и их различных обобщающих модификаций).

3. Проведен аналитический обзор современного состояния, опыта практического применения и направлений дальнейшего совершенствования метода дуальных энергий в системах цифровой рентгенографии, предназначенных для дефектоскопии и досмотрового контроля объектов, в ходе которого было, в частности выявлено, что точность оценки атомного

номера (эффективного атомного номера) материала ОК с помощью метода дуальных энергий существенно зависит от квантового шума (статистических флуктуаций результатов регистрации излучения).

4. Проведен сравнительный анализ различных определений понятия эффективного атомного номера материала многокомпонентного объекта, в результате которого были предложены формальные определения данного понятия для случаев: однократного просвечивания объектов с известной массовой толщиной немоноэнергетическим (рентгеновским) излучением; двукратного просвечивания объектов с известной массовой толщиной немоноэнергетическим (рентгеновским) излучением.

5. Разработана математическая модель изображения, сформированного МССЦР, которая учитывает трансформацию энергетического спектра рентгеновского излучения объектом контроля и шум, обусловленный квантовой природой излучения.

6. Разработана математическая модель радиационной прозрачности ОК с учётом квантового шума.

7. Предложено понятие множества допустимых решений для метода дуальных энергий, которое учитывают технические возможности системы досмотрового контроля и ее назначение.

8. Усовершенствована методика оценки эффективных атомных номеров материалов ОК и их структурных фрагментов методом дуальных энергий при проведении досмотрового контроля;

9. Разработан алгоритм статистической оценки влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов контролируемых объектов методом дуальных энергий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Ван Я.** Современное состояние и перспективы развития систем цифровой рентгенографии для дефектоскопии, диагностики и досмотрового контроля объектов (обзор) / В.А. Удод, Я. Ван, С.П. Осипов, С.В. Чахлов, Е.Ю. Усачёв, М.Б. Лебедев, А.К. Темник // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 11–28.
2. **Ван Я.** Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов/ С.П. Осипов, В.А.Удод, Я. Ван // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 35–56.
3. **Ван Я.** 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.
4. **Ван Я.** Сравнительный анализ различных определений понятия эффективного атомного номера материала многокомпонентного объекта / В.А. Удод, С.П. Осипов, Я. Ван // Дефектоскопия. – 2018. – № 9. – С. 44–56.

Публикации в изданиях из базы данных Scopus:

5. **Wang Y.** The Mathematical Model of Image, Generated by Scanning Digital Radiography System / V.A. Udod, S. Osipov, Y. Wang // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 168, Issue 1, Article number 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012042.
6. **Van J.** State of the art and development trends of the digital radiography systems for cargo inspection / V. Udod, J. Van, S. Osipov, S. Chakhlov, A. Temnik // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 671, Issue 1, Article number 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012059.
7. **Wang Y.** Application of dual energy method for non-destructive testing of materials designed to work in extreme conditions / S. Chakhlov, Y. Wang, S. Osipov, V. Udod // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 102, Article number 01009. DOI: 10.1051/matecconf/201710201009.

Публикации в других научных изданиях:

8. **Wang Yanzhao.** Application of digital radiography systems for object inspection // V Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное

приборостроение, технологии, безопасность». – Томск, 25-29 мая 2015. – С. 400–403.

9. **Ван Я.** Современное состояние и перспективы развития систем цифровой рентгенографии для досмотрового контроля объектов / В.А. Удод, Я. Ван, С.П. Осипов, С.В. Чахлов, А.К. Темник // Российская школа конференции "Информационные технологии неразрушающего контроля" с международным участием. – Томск, 27-30 октября 2015. – С. 48–53.

10. **Ван Яньчжао.** Основные направления совершенствования систем цифровой рентгенографии для досмотрового контроля объектов // VI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». – Томск, 23-27 мая 2016. – Т. 1. – С. 56–60.

11. **Ван Яньчжао.** Современное состояние и перспективы развития радиационного контроля объектов методом дуальных энергий / С.П. Осипов, В.А. Удод, Яньчжао Ван // IV Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest: ». –Новосибирск, 28-30 июня 2017. – С. 20–22.

12. **Ван Яньчжао.** Способы расчета эффективного атомного номера многокомпонентного объекта // VI Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» ». – Томск, 9-14 октября 2017. – С. 24.