

Штейн Александр Михайлович

**РАСПОЗНАВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ
ЭНЕРГИЙ В ДОСМОТРОВЫХ КОМПЛЕКСАХ С БЕТАТРОННЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Чахлов Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **Сырямкин Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий кафедрой Управления качеством факультета инновационных технологий.

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

Ведущая организация – Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры» им Д.В. Ефремова (АО «НИИЭФА»)

Защита состоится "25" декабря 2017 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного Совета Д212.269.09 при ФГАОУ НИ ТПУ по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд..

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

Автореферат разослан " " октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д212.269.09
к.т.н., доцент



Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Задача обнаружения недопустимых вложений в товарах, грузах и транспортных средствах является одной из самых важных проблем, которые стоят перед таможенными и пограничными органами стран мира, антитеррористическими подразделениями, а также службами обеспечения безопасности перевозок воздушным, железнодорожным, автомобильным и водным видами транспорта. Здесь под недопустимыми вложениями понимаются объекты, которые не включены в товарную декларацию, или объекты, относящиеся к классам объектов, перемещение которых через государственную границу или в транспортном средстве либо запрещено, либо строго регламентируется законодательствами сопредельных государств. Из сказанного выше следует, что должна решаться задача распознавания материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов (локальных вложений).

Под распознаванием (идентификацией) материалов применительно к досмотровому контролю традиционно понимают различение материалов объекта контроля или его структурных фрагментов по эффективному атомному номеру или другому связанному с ним параметру и соотнесение их (материалов) с одним из достаточно широких классов материалов. Количество классов определяется не только задачей, стоящей перед контролирующими органами, но и наличием физических закономерностей и технических возможностей, позволяющих разделять совокупность материалов на классы. Каждому из классов соответствует свой диапазон изменения эффективного атомного номера и наиболее типичный представитель. В досмотровом контроле используют достаточно условное деление материалов на классы: органические материалы; минеральные материалы; легкие металлы; металлы; тяжелые металлы. Количество классов распознаваемых материалов зависит от диапазона энергий используемого источника рентгеновского излучения, определяемого размером объекта досмотрового контроля.

Двухэнергетическая реализация цифровой радиографии, называемая методом дуальных энергий, является основным методом, применяемым для распознавания материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов. Есть несколько факторов, обуславливающих необходимость дальнейшего развития и совершенствования систем инспекционного досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов. К основным факторам относятся: рост пассажирского и грузового потока через границы различных государств; увеличение количества очагов международной напряженности с локальными военными конфликтами; возросший уровень террористической опасности.

Следовательно, тема диссертационных исследований является актуальной. Это подтверждается тем, что значительная часть работы выполнялась в рамках Государственного задания в сфере научной деятельности – проект № 1385 «Разработка научных основ радиационной диагностики материалов, изделий и конструкций», гранта РФФИ № 13–08–98027 «Разработка информа-

ционной системы идентификации локальных включений на основе метода многоэнергетической цифровой рентгенографии» и контрактов с фирмой PowerScan (КНР) 2013–2017 годов по разработке и совершенствованию алгоритмов распознавания материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов.

Степень разработанности темы. Проблемы, связанные с распознаванием материалов методом дуальных энергий в досмотровых комплексах с бетатронными источниками излучения, анализируемые в диссертации, рассматриваются на основе работ отечественных и зарубежных авторов, исследовавших теоретические, методологические, метрологические, алгоритмические, вычислительные и другие аспекты высокоэнергетической реализации метода дуальных энергий. Однако, разработка обобщённой математической модели систем досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов и их фрагментов различными реализациями высокоэнергетического метода дуальных энергий с учётом параметров и потребительских характеристик систем и дополнительных ограничений на них проводится впервые.

Теоретические вопросы дистанционного досмотрового контроля с распознаванием материалов объектов и их структурных фрагментов рассматриваются с учетом результатов исследований таких авторов, как А.А. Буклей, Ю.Н. Гавриш, С.А. Огородников, О.Д. Ополонин, В.И. Петрунин, В.Д. Рыжиков, P.J. Bjorkholm, J.K. Kim, Y. Liu, J.S. Park, B.D. Sowerby, J.R. Tickner, G. Zentai и др. Следует отметить, что в работах указанных авторов не в полной мере обсуждены вопросы, связанные с проверкой адекватности соответствующих математических моделей формирования и обработки радиографической информации.

Алгоритмические и вычислительные аспекты нахождения параметров метода дуальных энергий в досмотровом контроле и рентгеновской вычислительной томографии исследовались в работах L.A. Lehmann, R.E. Alvarez, A. Macovski, W.R. Brody, W.A. Kalender, Zhengrong Ying, Ram Naidu, Carl R. Crawford и других, но до последнего времени отсутствовали алгоритмы оценки параметров метода дуальных энергий, которые отличались бы одновременно высокой точностью и высокой производительностью.

Исследованию влияния различных физических и технических факторов на качество распознавания материалов объектов досмотрового контроля в общеметодологическом контексте и в конкретных реализациях инспекционных досмотровых комплексов посвящены статьи Я.А. Бердникова, В.Т. Лазурика, М.Б. Лебедева, Д.В. Рудычева, Е.Ю. Усачева, Shouyuan Chen, D.C. Dinca, U. Ewert, Grigory Golovin, S. Kolkoori, Cameron Miller, J.M. Rommel, A.Y. Saverskiy, Chuanxiang Tang, N. Wrobel, U. Zscherpel, и др. Остался ряд нерешённых вопросов, связанных с оценкой качества распознавания материалов для малых мощностей излучения и с выбором разрядности аналого-цифровых преобразователей.

Идентификационным параметром объектов контроля и их фрагментов помимо параметров распознавания материалов является их масса, вопросам измерения которой посвящены, например, статьи и патенты Robert J. Ledoux, William Bertozzi и других, но приведённых в них данных недостаточно для разработки и адаптации алгоритмов оценки массы крупногабаритных фрагментов в реальных досмотровых системах.

Объект исследования. Методы и алгоритмы распознавания материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов.

Предмет исследования. Системы рентгеновского досмотрового контроля крупногабаритных объектов с бетатронными источниками излучения.

Цель работы. На основе использования известных физических закономерностей взаимодействия фотонного излучения с веществом усовершенствовать алгоритмы распознавания материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов и разработать методы выбора и оценки параметров соответствующих систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель системы досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов и их фрагментов различными реализациями высокоэнергетического метода дуальных энергий.
2. Предложить критерии адекватности моделей систем досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов и их фрагментов.
3. Усовершенствовать алгоритмы оценки параметров метода дуальных энергий для увеличения их точности и быстродействия.
4. Экспериментально определить границы применимости распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий для малых доз облучения.
5. Разработать алгоритм оценки массы объекта досмотрового контроля методом высокоэнергетической цифровой радиографии.

Научная новизна диссертационных исследований заключается:

1. В математической модели системы досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов и их фрагментов различными реализациями высокоэнергетического метода дуальных энергий.
2. В критериях адекватности моделей систем досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов и их фрагментов.
3. В высокоскоростном и высокоточном алгоритме оценки параметров метода дуальных энергий.
4. В оценке границ применимости распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий для малых доз облучения.
5. В алгоритмах оценки массы объекта досмотрового контроля методом высокоэнергетической цифровой радиографии и высокоэнергетическим методом дуальных энергий.

Практическая значимость работы. Разработана и экспериментально проверена совокупность алгоритмов расчета и оценки параметров метода дуальных энергий, а также определение массы объектов при использовании высокоэнергетических источников излучения. Они могут применяться при проектировании сканирующих систем цифровой радиографии, досмотровых комплексов и систем рентгеновской вычислительной томографии с функцией распознавания материалов контролируемого объекта.

Методы исследований. Для разработки методов и алгоритмов обработки информации в досмотровых комплексах с функцией распознавания материалов объектов и их фрагментов применялись методы экспериментальной физики, методы решения систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений; методы решения систем нелинейных интегрально-параметрических уравнений; методы оптимизации; методы теории вероятностей и математической статистики; методы обработки экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель системы досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов и их фрагментов различными реализациями высокоэнергетического метода дуальных энергий.
2. Критерии адекватности моделей систем досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов и их фрагментов.
3. Высокоскоростной и высокоточный алгоритм оценки параметров метода дуальных энергий.
4. Рекомендации об оценке границ применимости распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий для малых доз излучения.
5. Алгоритмы оценки массы объекта досмотрового контроля методом высокоэнергетической цифровой радиографии и высокоэнергетическим методом дуальных энергий.

Достоверность полученных результатов обеспечивается измерением исходных физических величин аналого-цифровыми преобразователями с погрешностью не более 0,5 % и подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных результатов. Математические соотношения и физические закономерности реализованы в алгоритмах и проверены экспериментально для задач, характерных для досмотрового контроля крупногабаритных объектов.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований использованы при разработке в российско-китайской лаборатории радиационного контроля и досмотра Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета инспекционного досмотрового комплекса с функцией распознавания материалов объекта и его фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий на базе малогабаритного бетатрона МИБ-9 и используются при чтении курса лекций и проведении лабораторных работ, а также практических занятий для студентов по дисциплинам «Методы

неразрушающего контроля», «Радиационный контроль и диагностика». В 2016 автору диссертации вручен диплом Инженер года «Инженерное искусство молодых» в номинации «Приборостроение и диагностика». По полученным новым высокоточным и высокоскоростным алгоритмам была модифицирована программа «Dual» и подана заявка в Роспатент на Государственную регистрацию программы для ЭВМ, а результаты диссертационных исследований были внедрены при разработке опытных образцов инспекционно-досмотровых комплексов, изготовленных Московским технологическим университетом.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались на: научно-технических семинарах Российско-китайской лаборатории Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета; на II Всероссийской с международным участием научно-практических конференциях по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (г. Иркутск, 2013 г.); на X Международная научной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (г. Томск, 2014 г.); на XI Европейской конференции по неразрушающему контролю (г. Прага, 2014 г.); на III Всероссийской с международным участием научно-практических конференциях по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (Алтай, 2015 г.); на IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 2015 г.); на X Всероссийской научно-практической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы» ВИС-2015 (г. Барнаул, 2015 г.); на IV Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (г. Бердск, 2017 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 16 печатных работах, из них 5 печатных работ опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК, 7 публикаций из БД Scopus.

Личный вклад автора.

Настоящая диссертационная работа представляет собой обобщение теоретических и экспериментальных исследований автора в области инспекционного досмотрового контроля крупногабаритных объектов. В опубликованных работах автору принадлежит: проведение экспериментальных исследований по распознаванию материалов объектов контроля и их фрагментов методом дуальных энергий; анализ, интерпретация и обобщение результатов экспериментов; сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 113 источника, и двух приложений, содержит 145 страниц машинописного текста, 12 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведён анализ и обзор литературы, посвящённый основам распознавания материалов и фрагментов объектов контроля (ОК) методом дуальных энергий (МДЭ).

Приведены соотношения для оценки параметров МДЭ и формулы их связи с параметрами ОК. Рассмотрены физические закономерности и базовые соотношения, определяющие два основных способа распознавания материалов МДЭ – по эффективному атомному номеру и по линиям уровней

На основе анализа состояния вопроса сформулирован ряд задач, решение которых, по мнению автора, будет способствовать совершенствованию и более эффективному применению высокоэнергетического метода дуальной энергии.

Во второй главе рассматриваются базовые подходы к оценке качества распознавания материалов ОК двумя основными реализациями МДЭ.

В первом разделе второй главы приводится совокупность математических соотношений, предназначенных для оценки погрешности определения параметров распознавания (ПР) по эффективному атомному номеру и линиям уровней.

На выходе измерительной линейки ИДК с функцией распознавания материалов ОК формируются исходные радиографические изображения J_1 и J_2 , соответствующие максимальным энергиям рентгеновского излучения E_i , $i=1,2$. В тексте диссертации подробно рассмотрен процесс получения сигналов J_1 и J_2 и их квантовые шумы для импульсных источников излучения в предположении, что эти сигналы пропорциональны поглощенной дозе излучения в сцинтилляторах линейки.

Трансформация исходных изображений J_i в нормированные изображения R_i состоит из ряда последовательных преобразований (калибровка по «чёрному», по «белому», нормировка на сигнал с опорного детектора и линеаризация) и сопровождается соответствующей трансформацией шумов.

$$\begin{aligned}
 -\ln \frac{\int_0^{E_1} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-A(x,y)w_1(E)-B(x,y)w_2(E)} [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE}{\int_0^{E_1} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE} &= R_1(x, y) \\
 -\ln \frac{\int_0^{E_2} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_2) e^{-A(x,y)w_1(E)-B(x,y)w_2(E)} [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE}{\int_0^{E_2} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_2) [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE} &= R_2(x, y),
 \end{aligned} \tag{1}$$

здесь $w_1(E)$, $w_2(E)$ – энергетические зависимости эффекта Комптона и эффек-

та рождения пар.

Если в качестве параметра распознавания (ПР) используется эффективный атомный номер Z нормированные изображения $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ поступают в блок совместной обработки, где для всех точек (x, y) изображения параметры МДЭ $A(x, y)$ и $B(x, y)$ находятся как решение нелинейной системы интегрально-параметрических уравнений

В области высоких энергий рентгеновского излучения оценка $Z_v(\rho H, Z)$ связана с параметрами МДЭ соотношением

$$Z_v(\rho H, Z) \approx \frac{B(\rho H, Z)}{A(\rho H, Z)}. \quad (2)$$

В линейном приближении дисперсия $DZ_v(\rho H, Z)$ оценивается по формуле

$$DZ_v(\rho H, Z) \approx \frac{(1+p)[(g_{21} + Zg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z)/p + (g_{11} + Zg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z)]}{nG^2(\rho H, Z)(\rho H)^2}. \quad (3)$$

где

$$g_{ij} = g_{ij}(\rho H, Z) = \frac{\int_0^{E_i} w_j(E) \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE}{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE}$$

$$G(\rho H, Z) = g_{11}(\rho H, Z)g_{22}(\rho H, Z) - g_{12}(\rho H, Z)g_{21}(\rho H, Z).$$

Число импульсов источника излучения низкой энергии E_1 равно n_1 , высокой E_2 - n_2 , их отношение $p = n_1/n_2$ и общее число импульсов в пакете $n = n_1 + n_2$.

Погрешность (среднеквадратическая ошибка) измерения ΔZ эффективного атомного номера Z связана с дисперсией: $\Delta Z_v(\rho H, Z) = \sqrt{DZ_v(\rho H, Z)}$.

Существует оптимальное значение параметра p_{opt} , при котором значение дисперсии $DZ_v(\rho H, Z)$ минимально

$$p_{opt}(\rho H, Z) = \frac{g_{21} + Zg_{22}}{g_{11} + Zg_{12}} \sqrt{\frac{\tau_1(\rho H, Z)}{\tau_2(\rho H, Z)}}. \quad (4)$$

Количество импульсов в пакете, необходимое для формирования пары строк изображений $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ для заданного потребителем предельного уровня погрешности оценки $Z - \Delta Z_{lim}$ (разрешение по Z) находится по формуле

$$n(\rho H, Z) \approx \frac{(1+p)[(g_{21} + Zg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z)/p + (g_{11} + Zg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z)]}{G^2(\rho H, Z)(\rho H)^2 \Delta Z_{lim}^2}. \quad (5)$$

Выражения (3), (5) выведены для случая, в котором оценка $Z_v(\rho H, Z)$ для материала ОК производится для одной точки изображения (пикселя). На практике изображение минимального фрагмента, задаваемого потребителем, состоит из M пикселей, $M \gg 1$. Тогда в качестве ПР используется среднее значение оценки $Z - \overline{Z_v(\rho H, Z)}$ с дисперсией $D\overline{Z_v(\rho H, Z)}$

$$D\overline{Z_v(\rho H, Z)} = \frac{DZ_v(\rho H, Z)}{M}. \quad (6)$$

Увеличивая размер фрагмента, можно улучшить качество распознава-

ния или при неизменном качестве повысить производительность досмотра.

Формулы (1..6) представляют собой математическую модель ИДК с функцией распознавания материалов по эффективному атомному номеру.

Если в качестве параметра распознавания используются линии уровней, на основе нормированных изображений $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ строится одно изображение параметра распознавания:

$$\mathbf{Q} = \left\{ Q(x, y) = \frac{R_2(x, y)}{R_1(x, y)} \right\}. \quad (7)$$

Материал ОК в точке с координатами (x, y) сопоставляется с некоторым классом материалов, если выполняется ограничение

$$U_-(R_1(x, y)) < Q(R_1(x, y)) \leq U_+(R_1(x, y)), \quad (8)$$

где $U_-(x, y)$, $U_+(x, y)$ – соответствующие линии уровня «снизу» и «сверху» для данного класса материалов.

В диссертации приводятся формулы для параметра Q , аналогичные (1..6) и позволяющие оценить дисперсию этого параметра, производительность досмотра, а также определить оптимальное соотношение импульсов низкой и высокой энергий.

Для подтверждения применимости разработанных математических моделей были выполнены базовые расчеты и эксперименты по определению среднеквадратического отклонения атомного номера ΔZ_V и идентификационного параметра ΔQ для известных материалов.

Расчеты проводились для пар максимальных энергий рентгеновского излучения $E_1=4,5$ МэВ, $E_2=7,5$ МэВ и $E_1=4,5$ МэВ, $E_2=9$ МэВ. Значения массовых толщин ОК ρH варьировались в диапазоне от 10 до 120 г/см², Z принимал значения 6, 13, 26 и 82. Расчёты проводили для бетатрона МИБ-4/9 с характеристиками: $E_{\max}=9$ МэВ; $P_{0\max}=20$ Р/мин; $v=200$ с⁻¹. Геометрическая схема ИДК характеризовалась параметрами: фокусное расстояние $F=4,2$ м; детекторы на основе сцинтиллятора CdWO_4 толщиной $h_d=30$ мм и поперечными размерами $a_d \times b_d=5 \times 6$ мм². Число импульсов для энергии E_1 $n_1=3$, а для большей энергии E_2 $n_2=1$. Минимальное число пикселей фрагмента $M=16$.

Экспериментальные исследования проводились на ИДК ТПУ. Тестовый объект, состоящий из фрагментов с различной массовой толщиной из органических материалов, алюминия, железа и свинца, сканировали узкими верными пучками рентгеновского излучения с максимальными энергиями $E_1=4,5$ МэВ и $E_2=9$ МэВ. В диссертации приведены подробные таблицы расчетных данных, но более наглядное представление дает рисунок 1, где сопоставляются результаты экспериментальных и расчётных зависимостей $\Delta Z_V(\rho H)$ и $\Delta Q_V(\rho H)$.

Данные проведенных расчетов и экспериментов позволят сделать несколько выводов. В исследуемом диапазоне изменения ρH экспериментальные оценки погрешности определения ПР либо близки к расчётным значениям, либо меньше их. Погрешность ΔZ_V более значительна для малых и больших толщин. Величина ΔQ в области малых толщин меняется незначительно. Как ΔZ_V , так и ΔQ уменьшаются с ростом высокой энергии E_2 .

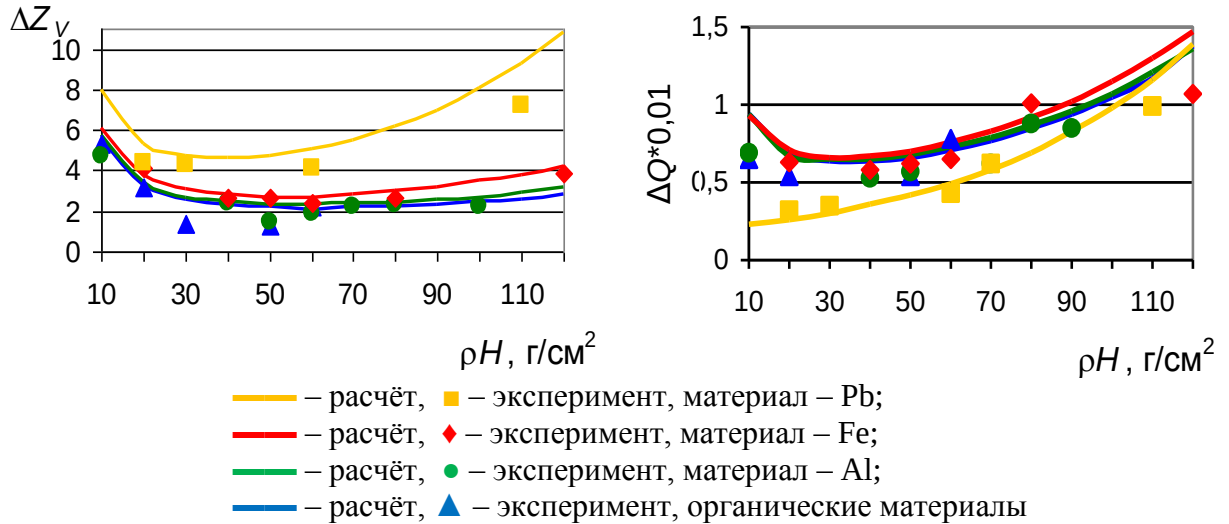


Рисунок 1 – Расчетные и экспериментальные зависимости $\Delta Z_V(\rho H)$ и $\Delta Q(\rho H)$

Что касается выбора соотношения импульсов в пакете p_{opt} , то результаты расчетов сводятся к следующему. Величина p_{opt} при распознавании по Q практически близка к аналогичным значениям при распознавании по Z , расхождение не более 10 %. Для пары энергий 4,5 – 9 МэВ p_{opt} всегда больше, чем для пары 4,5 – 7,5 МэВ, причем расхождение более значительно при больших массовых толщинах. С возрастанием массовой толщины объекта ρH p_{opt} монотонно увеличивается. Для бетатрона МИБ-9, параметры которого брались за исходные данные для расчетов, при массовых толщинах ОК до 120 г/см² оптимальное соотношение импульсов низкой и высокой энергий равно 3:1.

Рассмотренная математическая модель двух основных реализаций способов распознавания материалов с помощью МДЭ учитывает всю последовательность трансформации исходных радиографических изображений с учетом квантовых шумов. Полученные соотношения могут быть использованы для оценки характеристик ИДК, точности оценки параметров распознавания, производительности контроля.

Во втором разделе второй главы рассматривается обобщенный критерий адекватности моделей распознавания с помощью МДЭ, учитывающий степень близости идеальных и экспериментальных значений ПР материалов. Проверка степени близости теоретических и экспериментальных ПР проводилась на ИДК Томского политехнического университета для пары максимальных энергий рентгеновского излучения $E_1=4,5$ МэВ, $E_2=9$ МэВ. Область потребительского интереса ограничивалась множеством

$$M_I = \{(\rho H, a) : \rho H \in \mathbf{R}(a) = \{20, 40, 60, 80, 100\}; a \in \mathbf{A} = \{6, 13, 26\}\}. \quad (9)$$

Для регистрации излучения в ИДК применены детекторы на основе сцинтиллятора CdWO_4 длиной 30 мм, линейка с разрядностью АЦП 16. Экспериментально проверялись критерии адекватности распознавания по Z и по способу линий уровней. На рисунке 2 приведены теоретические, расчётные и экспериментальные зависимости $Z_{eff}(\rho H)$ и $Q(R_1)$. Из анализа данных,

приведённых на рисунке 2, можно сделать вывод об адекватности моделей распознавания для области потребительского интереса (9): по эффективному атомному номеру для $\Delta Z_{eff} \approx 5$; методом функций уровней для $\Delta Q \approx 0,012$.

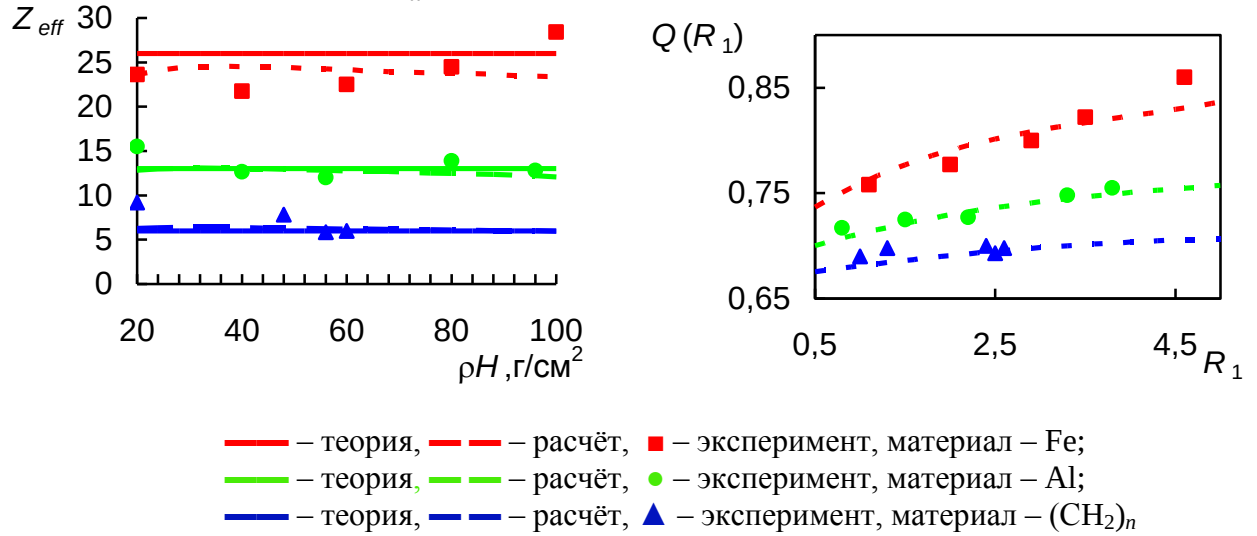


Рисунок 2 – Теоретические, расчётные и экспериментальные зависимости параметров распознавания

В главе 3 рассматриваются несколько способов определения параметров МДЭ, основанных на использовании предварительно рассчитанных или определенных экспериментальным путем зависимостей правых частей системы (1) от параметров МДЭ в диапазонах их изменения, интересующих потребителя, и вычисления параметров МДЭ методом обратных функций.

Наиболее правомерны предлагаемые подходы для диапазона низких энергий рентгеновского излучения $E_{\max}$, меньших 3 – 4 МэВ, но больших 1,022 МэВ, где вклад эффекта рождения пар и фотоэффекта в ослабление рентгеновских фотонов с веществом крайне незначителен. Для подтверждения этого вывода была приведена серия расчетов зависимости $R_2(A, B)$ для $E_{\max}=3,5$ МэВ в диапазоне изменения параметра B от 10 г/см^2 до 120 г/см^2 . Расчеты показали, что для диапазона изменения эффективного атомного номера Z вещества ОК от 5 до 82 $R_2(A, B)$ практически не зависит от A , расхождение не превосходит 0,3 % (рисунок 3).

Была также проведена серия расчетов зависимости $R_1(A, B)$ для высокой энергии 9 МэВ и диапазонов изменения параметров, указанных выше. На рисунке 4 приведены графики типичных зависимостей $R_1(A, B)$ для нескольких уровней параметра B .

Предложена высокоточная аппроксимация функции $R_2(B)$ вида

$$R_2(B) = \left(\frac{1}{c_1 + c_2 B + c_3 B^2} + c_4 \right) B \quad (10)$$

где c_1, c_2, c_3, c_4 – коэффициенты аппроксимации, которые не зависят от параметров A и B . Во всей области изменения параметров A и B погрешность аппроксимации (10) не превосходит 0,3 %. Аппроксимация может быть использована для реализации метода обратных функций, чтобы найти параметр B , исходя из значения второго информативного параметра R_2 . Указанная

реализация сводится к предварительному табулированию функции $B(R_2)$.

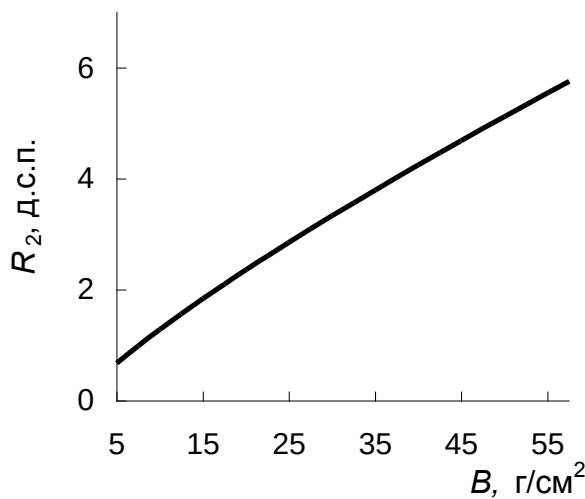


Рисунок 3 – Зависимость $R_2(A, B)$ для $E_{\max}=3,5$ МэВ и $5 < Z < 82$

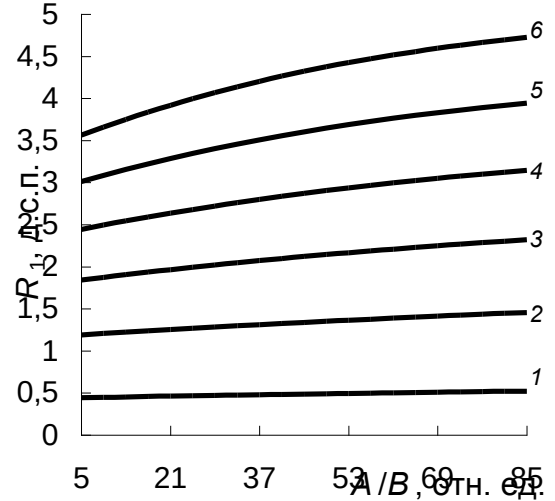


Рисунок 4 – Зависимость $R_1(A, B)$ для $E_{\max}=9$ МэВ и $5 < Z < 82$

1 – $B=10$ г/см²; 2 – $B=30$ г/см²;
3 – $B=50$ г/см²; 4 – $B=70$ г/см²;
5 – $B=90$ г/см²; 6 – $B=110$ г/см²

Анализ результатов расчетов показал, что для аппроксимации зависимостей $R_1(A, B)$ при фиксированных значениях параметра B могут быть использованы полиномы третьей степени, трансформированные следующим образом

$$R_1(A, B) = \left(p_1 + p_2 \frac{A}{B} + p_3 \left(\frac{A}{B} \right)^2 + p_4 \left(\frac{A}{B} \right)^3 \right) B, \quad (11)$$

где p_1, p_2, p_3, p_4 – коэффициенты аппроксимации, зависящие от уровня параметра B . Погрешность аппроксимации (11) для всей области изменения A, B не превысила 0,02 %. Каждому уровню параметра B будет соответствовать четверка чисел (p_1, p_2, p_3, p_4). Выражение (11) позволяет табулировать функции $A(R_1, B)$ для полного набора уровней параметра B , необходимого для эффективного применения предлагаемого алгоритма.

Алгоритм определения параметров МДЭ, основанный на обращении (1) и формулах (10), (11) будет состоять из двух этапов. На первом этапе по измеренному значению R_2 находится с помощью дискретизации зависимости $B(R_2)$ значение параметра B . При необходимости применяется линейная интерполяция. В каждой точке для нахождения параметра B необходимо не более 6 простейших арифметических операций и двух обменов с памятью. На втором этапе по измеренному значению R_1 и известному B находится параметр A с помощью табулированной функции $A(R_1, B)$. При необходимости применяется двумерная линейная интерполяция. Для оценки параметра A необходимо не более 37 простейших арифметических операций и четырех обменов с памятью. В итоге расчет изображения эффективного атомного номера может занимать десятые доли секунды.

По критерию, учитывающему быстродействие и точность оценки параметров МДЭ, предложенный алгоритм является высокоэффективным и

позволяет формировать конечные изображения в различных реализациях МДЭ в режиме реального времени, что существенно улучшает потребительские характеристики ИДК и рентгеновской вычислительной томографии с функцией распознавания материалов ОК.

Четвёртая глава посвящена теоретическому и экспериментальному анализу особенностей распознавания материалов ОК с помощью МДЭ для низкой мощности дозы рентгеновского излучения. Пусть в процессе экспериментальных исследований для максимальной мощности дозы излучения P_0 получено, что материал фрагмента с площадью изображения $S_{\gamma 0}$ распознается с вероятностью γ . Уравнение связи основных технических характеристик ИДК при другой мощности дозы P имеет вид

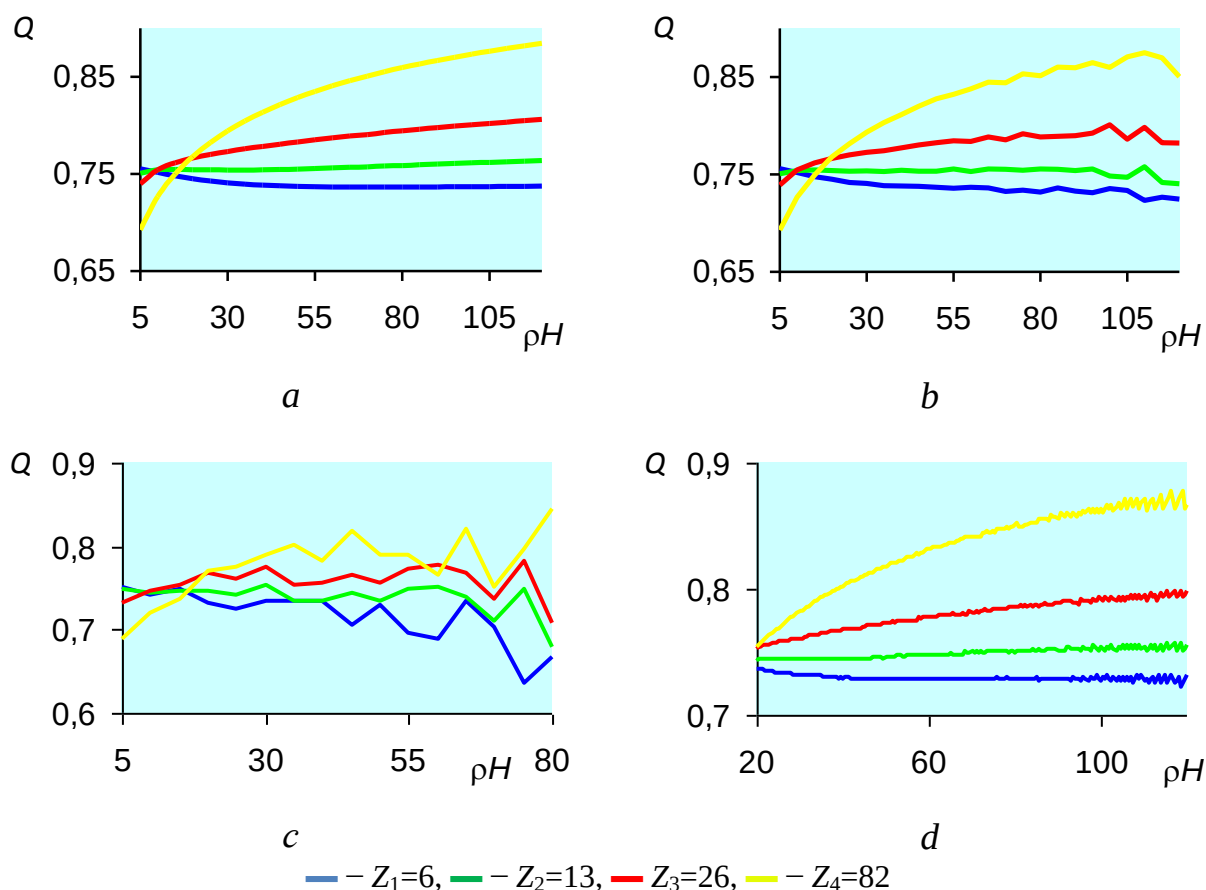
$$S_{\gamma}(k_L + k_H) = \frac{P_0 S_{\gamma 0}}{PM} \left(\frac{L}{\Pi_0} - T_0 \right), \quad (12)$$

В выражении (12) S_{γ} – требуемое значение площади фрагмента, распознаваемого с вероятностью γ ; L – усредненная длина ОК; M – количество столбцов всего изображения; Π_0 – производительность для максимальной мощности излучения, под которой понимается средняя скорость колонны транспортных средств; T_0 – технологический промежуток времени между сканированием ОК; k_L , k_H – количество импульсов излучения с меньшей (low) энергией и с большей (high) энергией в пакете импульсов.

Соотношение (12) показывает, что уменьшение мощности дозы источника рентгеновского излучения можно компенсировать снижением производительности контроля и (или) увеличением площади фрагмента ОК, материал которого распознается с заданной степенью доверия. Но есть другие факторы, которые необходимо принять во внимание. Малое число регистрируемых фотонов приводит к ухудшению качества распознавания не только за счет увеличения доли квантовых шумов. Оно обуславливает снижение сигналов до таких уровней, при которых происходит заметное смещение оценки ПР материалов, вызванное оцифровкой.

Для исследования ухудшения качества распознавания методом линий уровней при уменьшении мощности дозы в k_P раз при различной разрядности АЦП k была проведена серия расчётов, часть которых представлена в виде рисунка 5. Расчёты проводились для пары энергий 4 и 7,5 МэВ. Исследуемый диапазон мощностей дозы излучения от 0,25 до 5 сГр/мин.

Из анализа данных, представленных на рисунке 5, следует вывод о значимом влиянии разрядности АЦП на величину наблюдаемых смещений Q (рисунок 5 c). В итоге можно считать, что 20-ти разрядное АЦП при изменении мощности дозы в 20 раз обеспечивает удовлетворительные результаты по разделению материалов на принятые классы вплоть до массовых толщин 120 г/см^2 (рисунок 5 d).



$a - k=28, k_p=1; b - k=16, k_p=5; c - k=16, k_p=20; d - k=20, k_p=20$

Рисунок 5 – Зависимости $Q(\rho H, Z_k)$ при различных мощностях дозы излучения и разрядности АЦП

В четвертой главе диссертации представлены заключительные экспериментальные исследования по оценке качества распознавания материалов тестовых объектов(ТО) при различных уровнях мощности дозы источника излучения. Эксперименты проводились на ИДК ТПУ для пары энергий 4,5 и 9 МэВ.

Распознавание осуществлялось способом линий уровней Q . Зависимости $Q(R_1)$ аппроксимировали параболой $Q(R_1) = a_0 + a_1 R_1 + a_2 R_1^2$ (13)

Коэффициенты аппроксимации были предварительно найдены экспериментально сканированием образцов базовых материалов разной толщины из общепринятых классов, причем для двух типов линеек детекторов: штатной и укороченной линейки из КНР. Результаты измерений после их обработки даны в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры аппроксимации (30) a_0 , a_1 , a_2 для штатной системы детектирования ■ и детекторов из КНР ■

Z	a_0		a_1		a_2	
6	0,74432	0,6802	-0,00137	-0,00023	-0,0007	-0,0007
13	0,78134	0,7804	-0,02658	-0,01587	0,00631	0,00428
26	0,79869	0,85875	-0,02331	-0,03593	0,00711	0,00781
82	0,76753	0,7909	0,01269	-0,02777	0,00501	0,00101

Оценивалось качество распознавания следующих материалов: органические материалы – мука, капролон, вода; легкие металлы и неорганические материалы – алюминий, цемент, поваренная соль; металлы со средним значением эффективного атомного номера – сталь, медь; тяжелые металлы – свинец.

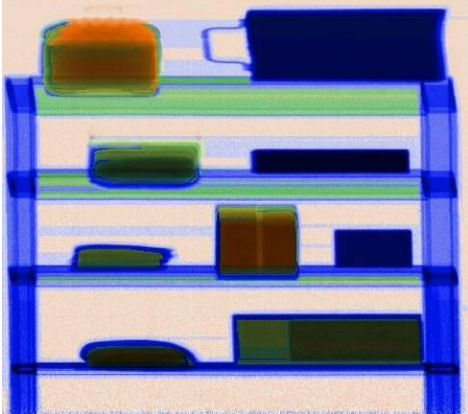
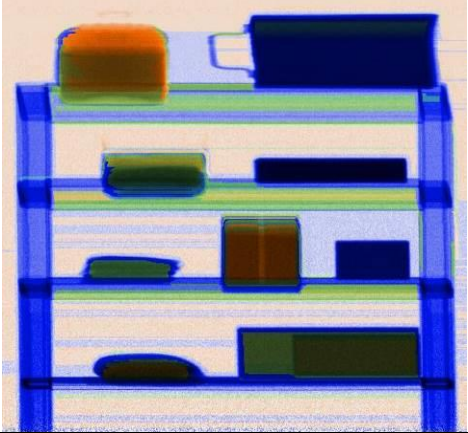
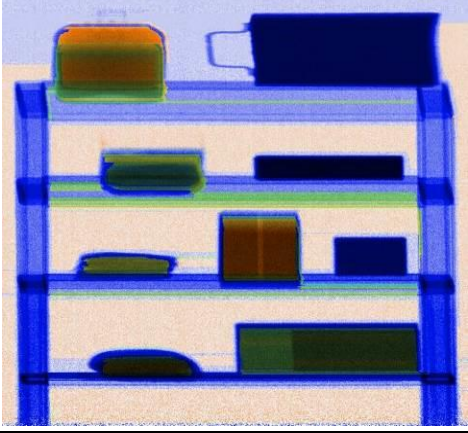
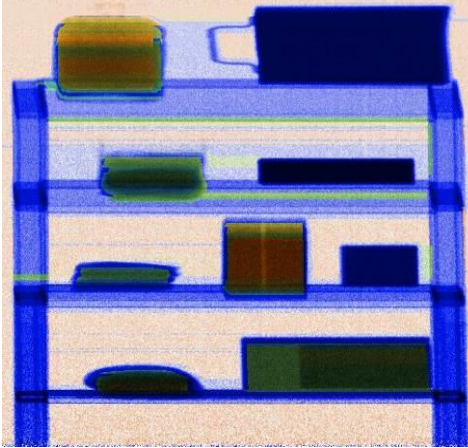
Всего было проведено 9 циклов сканирований ТО. В каждом цикле изменялась мощность дозы излучения – 3 Р/мин; 2 Р/мин; 1 Р/мин; 0,5 Р/мин. ТО от цикла к циклу отличались взаимным расположением фрагментов по высоте. Нижние блоки детекторов линейки работали при более низких уровнях мощности дозы излучения, чем центральные блоки. Для иллюстрации в автореферате приведены конечные изображения только одной комбинации ТО (таблица 2).

Изображения были получены с помощью модифицированной программы Dual с окном усреднения 5×5 пикселей, минимальный размер кластера – 10×10 пикселей. Изображения раскрашены в соответствии с цветовой гаммой, используемой фирмой Smith Detection (Heimann).

Анализ большого количества полученных изображений приводит к следующим выводам.

1. При мощности дозы излучения 0,5 Р/мин уверенно распознаются:
 - органика при массовой толщине от 13 до 80 г/см²;
 - легкие металлы (Al) – от 11 до 80 г/см²;
 - металлы (Fe) – от 13 до 75 г/см²;
 - тяжелые металлы (Pb) – от 20 до 70 г/см².
2. С уменьшением мощности дозы возрастают уровни шумов полутонных изображений и цветовые шумы, а также нарушается цвет значительной части фрагментов.
3. Искажения более выражены для нижней части изображений.
4. Граничные эффекты, обусловленные усреднением и кластеризацией, наиболее проявляются для фрагментов, расположенных в верхней части тестовых объектов.
5. Размер фрагмента, материал которого идентифицирует с заданной вероятностью, зависит от положения фрагмента по вертикали и от его размера в направлении распространения рентгеновских квантов.
6. Фрагмент из меди в значительной части случаев относится к классу тяжелых металлов. В таких случаях для коррекции распознавания материалов предложено использовать дополнительно информацию об эффективном атомном номере. Это связано с тем, что оценки эффективного атомного номера для медных фрагментов ближе к оценкам атомного номера для фрагментов из стали, чем для свинцовых фрагментов.

Таблица 2 Изображения тестовых объектов

Объект 3	$P_{\max}$, Р/мин	Изображение
	3	
	2	
	1	
	0,5	

В пятой главе приводятся результаты разработки алгоритма измерения массы ОК и их фрагментов методом высокоэнергетической цифровой радиографии.

Алгоритм оценки массы промышленного изделия основывается на том что, как правило, известна информация о его веществе. В этом случае достаточно иметь одно изображение ОК. Если не учитывать возможное геометрическое увеличение изображения, масса ОК или его фрагмента M_F оценивается с помощью формул

$$M_F = \sum_{(i,j) \in F} V \Delta t h_o \rho H_{ij} \quad , \quad m_{\text{int}}(E_{\text{max}}, \rho H_{ij}) \rho H_{ij} = R_{ij} \quad , \quad (14)$$

здесь F – проекция всего объекта или его фрагмента на поверхность радиографического изображения; V – скорость сканирования; Δt – время формирования одной строки изображения; m_{int} – интегральный массовый коэффициенты ослабления рентгеновского излучения; ρH_{ij} – толщина объекта по линии ij в г/см^2 . Определив предварительно расчетным или экспериментальным путем m_{int} и имея нормированное изображения объекта, можно оценить его массу полностью или какой-либо выделенной части.

При досмотровом контроле с функцией распознавания материалов формируются два промежуточных изображения МДЭ

$$A_{ij} = Z_{ij}(\rho H)_{ij}, \quad B_{ij} = (\rho H)_{ij} \quad (15)$$

Таким образом, изображение **B** дает один из сомножителей в формуле расчёта массы (14) и ее можно представить в следующем виде:

$$M_F = d_v d_z \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} B_{ij} \quad , \quad (16)$$

где d_v и d_z соответственно вертикальный и горизонтальный масштабы пиксела изображения; N_i – количество вертикальных пикселей в j -ом столбце выделенного фрагмента изображения, N_j – общее количество горизонтальных столбцов фрагмента.

Вертикальный масштаб пиксела определяется шагом линейки и геометрией просвечивания, горизонтальный скоростью сканирования и временем формирования одной строки изображения. В диссертации рассмотрены способы определения этих масштабов и оцениваются их погрешности.

В принципе может быть определена масса каждого пикселя или заданного кластера пикселей, и сформировано черно-белое или цветное изображение, каким образом распределена масса перевозимого груза в транспортном средстве. Такое изображение может дать дополнительную информацию для определения достоверности таможенной декларации.

Предложенные алгоритмы обработки одно- или двух-энергетических радиографических изображений позволяют оценить массы крупногабаритных ОК и их фрагментов как в случае наличия информации об объектах, так и в случае полного или частичного ее отсутствия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Создана математическая модель системы досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов и их фрагментов различными реализациями высокоэнергетического метода дуальных энергий. Математическая модель представляет собой совокупность математических соотношений, которые позволяют оценить погрешность определения ПР для двух реализаций метода дуальных энергий – распознавание по эффективному атомному номеру и по методу линий уровней.

2. В результате сравнения теоретических и экспериментальных оценок погрешности параметров распознавания доказана работоспособность предлагаемых алгоритмов оценки качества инспекционных досмотровых комплексов с функцией распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий.

3. Даны рекомендации по выбору структуры пакета импульсов высокоэнергетического рентгеновского излучения для формирования единичных строк идентификационных изображений метода дуальных энергий.

4. Разработаны критерии адекватности моделей досмотровых комплексов с функцией распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий и экспериментальное доказательство их работоспособности.

5. Предложен способ определения параметров в методе дуальных энергий, основанный на обращении двумерных функций и позволяющий сформировать изображения конечных параметров в различных реализациях метода дуальных энергий в режиме реального времени, что существенно улучшает потребительские характеристики систем досмотрового контроля и систем рентгеновской вычислительной томографии, предназначенных для распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов.

6. Доказана возможность экспресс-оценки параметров метода дуальных энергий с высокой точностью. После экспериментального определения коэффициентов аппроксимации вычислительная погрешность не превышает 1%, а время обработки всего изображения десятые доли секунды.

7. Предложен инвариант способа распознавания материалов, позволяющий связать качество распознавания с производительностью контроля и площадью фрагмента объекта контроля, материал которого идентифицируется с заданной вероятностью.

8. Экспериментально доказана возможность удовлетворительного разделения материалов с массовой толщиной от 20 до 100 г/см² на общепринятые классы, кроме тяжелых металлов, при мощности дозы бетатронного источника излучения порядка 0,25 сГр/мин·м.

9. Теоретически и экспериментально доказано, что уменьшение мощности поглощенной дозы излучения приводит к существенному изменению

диапазона радиометрических сигналов, в результате чего уменьшается диапазон толщин фрагментов, материалы которых идентифицируются с заданной вероятностью. Единственным подходом, позволяющим сохранить качество распознавания на заданном уровне для малых доз излучения, является увеличение минимальной площади фрагмента.

10. Предложены алгоритмы обработки одного или двух цифровых радиографических изображений, позволяющие оценить массы крупногабаритных объектов контроля и их структурно разделённых фрагментов как в случае наличия информации об объектах и фрагментах, так и в случае полного или частичного ее отсутствия.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. *Штейн, А.М.* Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики неразрушающего контроля и инспекции / В. А. Клименов, Ю. В. Алхимов, А. М. Штейн и др. // Контроль. Диагностика. – 2013. – №. 13. – С. 31–42.

2. *Штейн, А.М.* Непрерывный контроль крупногабаритных изделий литейного производства / А.М. Штейн, А.И. Чепрасов, В.А. Клименов и др. // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №. 1/2. – С. 267–270.

3. *Штейн, А.М.* Применение частотно-импульсных рентгеновских аппаратов для реализации режима дуальной энергии // Контроль. Диагностика. – 2013. – №. 13. – С. 117–122.

4. *Штейн А.М.* Применение цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии при исследовании строительных конструкций и в строительном материаловедении / В. А. Клименов, А. М. Штейн, С.П. Осипов и др. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – №. 6(53). – С. 116–127.

5. *Штейн, А.М.* Высокоэнергетический малодозовый метод распознавания материалов / А.Д. Абашкин, С.П. Осипов, А.М. Штейн // Ползуновский Альманах. – 2015. – №1. – С. 27–30.

Публикации в изданиях из базы данных Scopus

6. *Shteyn, A.M.* Parameter identification method for dual-energy x-ray imaging/ S.P. Osipov, S.V. Chakhlov, A.M. Shteyn // NDT and E International. – 2015. – Vol. 76. – Article number 1709. – Pp. 38–42.

7. *Shteyn, A.M.* Mass Determination Algorithms Using High Energy Digital Radiography / S.P. Osipov, O.S. Osipov, A.M. Shteyn // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1085. – Pp. 455–459.

8. *Shteyn, A.M.* About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method / S.P. Osipov, S.V. Chakhlov, A.M. Shteyn // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81. – Article number 012082. – Pp. 1–14.

9. *Shteyn, A.M.* Adequacy criteria of models of the cargo inspection system with material discrimination option / S.P. Osipov, Y. Wang, A.M. Shteyn // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015 – Vol. 81.– Article number 012082. – Pp. 1–14.

10. *Shteyn, A.M.* Investigations and non-destructive testing in new building design / S.P. Osipov, V.A. Klimenov, A.M. Shteyn // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81. – Article number 012082. – Pp. 1–14.

11. *Shteyn, A.M.* Betatron application in mobile and relocatable inspection systems for freight transport control / S.P. Osipov, S.V. Kasjyanov, A.M. Shteyn // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81. – Article number 012082. – Pp. 1–14.

12. *Shteyn, A.M.* Experimental Research of High-Energy Capabilities of Material Recognition by Dual-Energy Method for the Low- Dose Radiation / S.P. Osipov, S.V. Chakhlov, A.M. Shteyn // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 132. –Article number 012012. – Pp. 1–6.

Публикации в других научных изданиях

13. *Штейн, А.М.* Экспериментальные исследования возможности распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий для малых доз облучения/ С.П. Осипов, С.В. Чахлов, А.М. Штейн и др. // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» в 3 т. Т.1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 10–13.

14. *Stein, A.M.* Low dose customs inspection system for freight transport control / S.P. Osipov, S.V. Chakhlov, A.M. Stein // Journal of Malaysian Society for Non-Destructive Testing (NDT Spectra). – 2013. – Issue 7. – Pp. 17–19.

15. *Штейн, А.М.* Малодозовая ситема контроля грузового транспорта/ С.В. Чахлов, С.В. Касьянов, А.М. Штейн и др. // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-конференции, Томск, 16–18 Августа 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 65–68.

16. *Shteyn, A.M.* Energy Spectrum Modification of Bremsstrahlung X-ray Intensity/ S.V. Chakhlov, V.A. Udod, A.M. Shteyn // 11th European Conference on Non-Destructive Testing: proceedings, October 6–10, 2014. – Brno: Brno University of Technology, 2014. – Pp. 1–4.