

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Штейн Александр Михайлович

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

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат физико-математических наук,  
Чахлов Сергей Владимирович

Томск – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	17
1.1 Обзор литературы .....	17
1.2 Обоснование задач исследований .....	23
ГЛАВА 2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ .....	27
2.1 Оценка погрешности определения параметров распознавания высокоэнергетическим методом дуальных энергий .....	29
2.1.1 Общая часть способов распознавания материалов методом дуальных энергий.....	30
2.1.2 Распознавание материалов объектов контроля методом дуальных энергий по эффективному атомному номеру.....	38
2.1.3 Распознавание материалов объектов контроля и их фрагментов методом линий уровней.....	44
2.1.4 Примеры расчёта $\Delta Z_V$ и $\Delta Q$ .....	46
2.1.5 Экспериментальные исследования .....	47
2.1.6 Выбор соотношения импульсов в пакете .....	49
2.2 Критерии адекватности моделей досмотровых комплексов с функцией распознавание материалов объектов контроля.....	51
2.2.1 Обобщённый критерий адекватности моделей систем распознавания методом дуальных энергий.....	51
2.2.2 Распознавание по эффективному атомному номеру.....	53
2.2.3 Распознавание по методу линий уровней.....	56
2.2.4 Вычислительные формулы .....	58
2.2.4.1 Распознавание по эффективному атомному номеру.....	58

2.2.4.2 Распознавание по методу линий уровней .....	60
2.2.5 Экспериментальная проверка адекватности математических моделей распознавания материалов методом дуальных энергий.....	61
2.3 Выводы по главе 2.....	64
ГЛАВА 3. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ.....	65
3.1 Основы метода дуальных энергий .....	67
3.2 Основы подхода к экспрессному нахождению параметров метода дуальных энергий.....	71
3.3 Способ обратных функций для определения параметров метода дуальных энергий.....	73
3.4 Упрощенная физическая реализация способа обратных функций.....	75
3.5 Неявный способ обратных функций для определения параметров метода дуальных энергий.....	80
3.6 Выводы по главе 3.....	81
ГЛАВА 4. РАСПОЗНАВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ И ИХ ФРАГМЕНТОВ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ ДЛЯ НИЗКОЙ МОЩНОСТИ ДОЗЫ .....	82
4.1 Основные требования .....	83
4.2 Проверяемые предположения и гипотезы, проблемные вопросы.....	85
4.3 Влияние разрядности аналого-цифрового преобразователя на смещение информационных характеристик способа распознавания .....	89
4.3.1 Вычисление параметра распознавания материалов .....	90
4.3.2 Подход к оценке смещения информативного параметра распознавания, обусловленного снижением мощности дозы излучения..	92
4.3.3 Исследование влияния разрядности аналого-цифровых преобразователей на качество распознавания материалов расчетным путем.....	93

4.4	Экспериментальные исследования возможности распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий для малых доз излучения.....	96
4.4.1	Диапазон изменения уровней радиометрических сигналов при уменьшении мощности поглощенной дозы излучения .....	98
4.4.2	Экспериментальная оценка качества распознавания материалов методом дуальных энергий (простые тестовые объекты) .....	99
4.4.3.	Экспериментальная оценка качества распознавания материалов методом дуальных энергий (сложные тестовые объекты) .....	103
4.5	Выводы по главе 4.....	117
<b>ГЛАВА 5. АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ МЕТОДАМИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ.....</b>		
5.1	Основы алгоритма измерения массы объекта методом цифровой радиографии.....	120
5.2	Контроль промышленных объектов.....	123
5.3	Досмотровый контроль.....	124
5.4	Выводы по главе 5.....	128
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>		<b>129</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>		<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения в учебный процесс .....</b>		<b>144</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения в производственный процесс .....</b>		<b>145</b>

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$Z$  – эффективный атомный номер

$Q$  – параметр распознавания (идентификации) в методе линий уровней

$\rho$  – плотность материала объекта контроля

$\mu$  – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения

$m$  – массовый коэффициент ослабления гамма-излучения

$\Delta Z_{\text{lim}}$  – разрешение по эффективному атомному номеру

$\Delta Q_{\text{lim}}$  – разрешение по  $Q$

$\text{int}(x)$  – целая часть числа  $x$

$\varepsilon(E)$  – эффективность регистрации фотонов с энергией  $E$

## Сокращения

ОК – объект контроля

ИДК – инспекционно-досмотровый комплекс

МДЭ – метод дуальных энергий

ПР – параметр распознавания (идентификации)

СЦР – система цифровой радиографии

РВТ – рентгеновская вычислительная томография

ЛКО – линейный коэффициент ослабления

МКО – массовый коэффициент ослабления

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ТО – тестовый объект

ЛУЭ – линейный ускоритель электронов

## ВВЕДЕНИЕ

### 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 необходимо не только обнаружение недопустимого вложения, но и распознавание 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. Вся совокупность материалов природного, естественного и техногенного происхождения делится, как правило, на небольшое количество классов. 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. Настоящий этап развития цивилизации характеризуется несколькими основными факторами, обуславливающими 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 информационной 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 высокоэнергетическим методом дуальных энергий.

**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 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.

**Структура диссертационной работы.**

В первой главе проведён обзор литературы, посвящённый основам распознавания материалов и фрагментов объектов досмотрового контроля методом дуальных энергий. Приводятся соотношения для оценки параметров метода дуальных энергий и формулы их связи с параметрами контролируемых объектов. Рассмотрены два основных способа распознавания материалов методом дуальных энергий – по эффективному атомному номеру и методом линий уровней. Подробно обосновываются задачи исследований для усовершенствования алгоритмов распознавания материалов объектов досмотрового контроля и разработки методов выбора и оценки параметров соответствующих систем.

Во второй главе рассматриваются основные факторы, определяющие достоверность качества распознавания материалов объектов досмотрового контроля двумя основными способами, реализующими

высокоэнергетический метод дуальных энергий.

В первом разделе второй главы приводится совокупность математических соотношений, предназначенных для оценки погрешности определения параметров распознавания для двух реализаций высокоэнергетического метода дуальных энергий – по эффективному атомному номеру и методу линий уровней. Указываются параметры комплексов, влияющие на точность определения параметров распознавания. Даются рекомендации по формированию структуры пакетов импульсов высокоэнергетического рентгеновского излучения.

Для иллюстрации применимости предлагаемой методики на практике рассчитаны статистические погрешности идентификационных параметров для инспекционного досмотрового комплекса Томского политехнического института на базе малогабаритного бетатрона МИБ-9. Приводится сравнение экспериментальных и теоретических оценок погрешности идентификационных параметров фрагментов тестового объекта, доказывающее применимость на практике алгоритма оценки погрешности идентификационных параметров высокоэнергетическим методом дуальных энергий.

Во втором разделе второй главы рассматриваются обобщённые критерии адекватности математических моделей досмотровых комплексов с функцией распознавания веществ объектов контроля с помощью различных реализаций метода дуальных энергий. Анализируются два основных подхода к построению критериев адекватности – по конечным и промежуточным параметрам метода дуальных энергий. Критерии конкретизируются применительно к распознаванию по эффективному атомному номеру и по методу линий уровней. Приводятся результаты сравнения теоретических, расчётных и экспериментальных оценок идентификационных параметров фрагментов тестового объекта, просканированного веерными пучками рентгеновского излучения с максимальными парами энергий 4,5/7,5 и 4,5/9 МэВ. Доказывается возможность использования критериев

адекватности моделей досмотровых комплексов с функцией распознавания веществ объектов контроля и их фрагментов методом дуальных энергий при проектировании, а также для количественного сравнения качества различных комплексов.

**В главе 3** рассматриваются экспрессные способы определения параметров метода дуальных энергий. Реализации способа основаны на использовании предварительно рассчитанных или определенных экспериментальным путем зависимостей правых частей систем двух интегральных параметрических уравнений от двух искомых параметров в диапазонах их изменения, интересующих потребителя. Предлагаемые способы определения параметров в методе дуальных энергий позволяют формировать конечные изображения в различных реализациях метода дуальных энергий в режиме реального времени, что существенно улучшает потребительские характеристики инспекционных систем досмотрового контроля и систем рентгеновской вычислительной томографии, предназначенных для распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов.

**Четвёртая глава** посвящена теоретическому и экспериментальному анализу особенностей распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов методом дуальных энергий для низкой мощности дозы высокоэнергетического рентгеновского излучения, характерной для бетатронов. Формулируются основные проблемы распознавания материалов, связанные с уменьшением мощности дозы излучения. Доказывается, что для рассматриваемой задачи существенно изменяется диапазон изменения радиометрических сигналов, в результате чего уменьшается толщина фрагментов, материалы которых распознаются с заданной вероятностью. Указанный фактор наиболее значим для периферийных блоков радиометрических детекторов, то есть расположенных на значительном удалении от оси пучка рентгеновского излучения.

Вводится инвариант способа распознавания материалов, позволяющий

связать качество распознавания с производительностью контроля и площадью фрагмента объекта контроля, материал которого идентифицируется с заданной вероятностью. Доказывается, что в рамках поставленной задачи единственным путем в уже функционирующем ИДК, позволяющим сохранить качество распознавания на заданном уровне, является увеличение минимальной площади фрагмента. Экспериментально доказывается возможность удовлетворительного распознавания материалов объектов досмотрового контроля при уровнях мощности дозы рентгеновского излучения около 0,25 сГр/мин. Демонстрируется недостаточно уверенное распознавание материалов фрагментов объектов контроля на их границе.

**В пятой главе** приводятся результаты разработки алгоритма измерения массы крупногабаритных объектов контроля и их фрагментов методом высокоэнергетической цифровой радиографии. Алгоритм основывается на предварительной информации об атомном номере вещества объекта. Высокоэнергетический метод дуальных энергий дополняется блоком оценки массы объектов досмотрового контроля и их фрагментов. Предложенные алгоритмы обработки одного или двух цифровых радиографических изображений позволяют оценить массы крупногабаритных объектов досмотрового контроля и их фрагментов как в случае наличия информации об объектах, так и в случае полного или частичного ее отсутствия.

**В заключении** формулируются основные результаты и выводы, полученные в ходе проведенных исследований.



## **ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **1.1 Обзор литературы**

В последние десятилетия в различных областях науки и техники широко применяются системы цифровой радиографии (СЦР) крупногабаритных объектов [1–3]. По классификации Федеральной Таможенной Службы (ФТС) Российской Федерации такие системы имеют название – инспекционно-досмотровые комплексы (ИДК) [4–6]. Основной задачей ИДК является пресечение таможенных правонарушений [7–9]. Данные правонарушения сводятся к перемещению через государственную границу: товаров и грузов, наличие и (или) качественные характеристики, и (или) объём которых не соответствуют таможенным декларациям; изделий и материалов, запрещённых к вывозу (ввозу); товаров, изделий и материалов, строго регламентированных к перевозке. Инспекционно-досмотровые комплексы относятся к одним из наиболее эффективных технических средств таможенного контроля. Эффективность ИДК связана [10–12]: с их дистанционным применением; с высокой вероятностью обнаружения предметов контрабанды; с низкой вероятностью ложного срабатывания системы обнаружения; с высокой производительностью; с электронным документированием результатов досмотрового контроля и возможностью включения их в специализированные базы данных.

Инспекционно-досмотровые комплексы в различных своих реализациях состоят из следующих основных элементов [13–15]: высокоэнергетического источника рентгеновского излучения с системой радиационной защиты и щелевым коллиматором; цифрового линейного многоканального детектора; системы отображения, обработки и фиксации цифровых радиографических изображений. Для улучшения качества теневых радиографических изображений ИДК дополняются [16–18], например,

системами перемещения ОК между источником и детекторами и дополнительным коллиматором рентгеновского излучения. Радиационная безопасность персонала обеспечивается удалением операторской от зоны контроля, созданием защитного периметра, предупреждающей звуковой и световой индикацией.

В качестве источников высокоэнергетического рентгеновского излучения в ИДК применяются бетатроны и линейные ускорители электронов (ЛУЭ) [19–22].

В классических реализациях ИДК оператором анализируется полутонное цифровое радиографическое изображение с возможностями контрастирования, фильтрации, масштабирования и т.п. У такого подхода есть важнейший недостаток, связанный с невозможностью распознавания материалов фрагментов объектов досмотрового контроля.

Для устранения указанного выше недостатка инспекционные досмотровые комплексы дополняют функцией распознавания (идентификации) материалов ОК и структурных фрагментов. Здесь и далее под структурным фрагментом ОК понимается такой фрагмент, который можно отделить от других фрагментов по анализируемому изображению (изображениям) ОК. Для реализации функции распознавания в ИДК используется высокоэнергетический метод дуальных энергий (МДЭ) [23–26].

Становление и развитие этого метода в первую очередь связано с именами иностранных ученых R. E. Alvares, A. Macovsky, W. A. Kalender, а в России С. А. Огородникова, В.И. Петрунина, В.А Горшкова, Ю.Н. Гавриша.

Высокоэнергетический МДЭ основан [27] на представлении энергетической зависимости линейного коэффициента ослабления (ЛКО) гамма-излучения с веществом  $\mu(E)$  в виде суммы, первое слагаемое которой  $\mu_c(E)$  соответствует эффекту Комптона, а второе  $\mu_p(E)$  – эффекту рождения пар

$$\mu(E) = \mu_c(E) + \mu_p(E). \quad (1.1)$$

Второй базовой физической закономерностью МДЭ является замена каждого из слагаемых в формуле (1.1) произведением, один из сомножителей которого описывает энергетическую функцию, а второй сомножитель характеризует ослабляющий материал. Материал характеризует плотность  $\rho$  и эффективный атомный номер  $Z$ . Из сказанного выше следует, что выражение (1.1) будет выглядеть следующим образом [28]

$$\mu(E) = a(\rho, Z) f_C(E) + b(\rho, Z) f_p(E), \quad (1.2)$$

здесь  $f_C(E)$ ,  $f_p(E)$  – энергетические зависимости эффекта Комптона и эффекта рождения пар;  $a(\rho, Z)$ ,  $b(\rho, Z)$  – параметры, независимые от энергии.

Формулы для вычисления параметров  $a(\rho, Z)$ ,  $b(\rho, Z)$  записываются аналогично [28]

$$a(\rho, Z) = \rho, \quad b(\rho, Z) = \rho Z. \quad (1.3)$$

Пусть ОК толщиной  $H$  изготовлен из материала плотностью  $\rho$  и эффективным атомным номером материала  $Z$ . В МДЭ объект просвечивается двумя пучками рентгеновского излучения с различными максимальными энергиями  $E_1$  и  $E_2$ . Для определённости можно считать, что  $E_1 < E_2$ . Меньшую энергию принято называть низкой энергией (low energy), а большую – высокой энергией (high energy). Энергии  $E_1$  и  $E_2$  выбираются таким образом, что для энергии  $E_1$  вклад эффекта рождения пар в величину соответствующего радиометрического сигнала  $I_1(\rho H, Z)$  является практически незначимым, а для энергии  $E_2$  вклад эффекта рождения пар в сигнал  $I_2(\rho H, Z)$  существенен.

Выражения связи сигналов  $I_1$  и  $I_2$  с параметрами ОК имеют вид, аналогичный системе из [27, 29]

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^{E_1} S(E, E_1) e^{-Af_C(E) - Bf_p(E)} dE \\ I_2 &= \int_0^{E_2} S(E, E_2) e^{-Af_C(E) - Bf_p(E)} dE. \end{aligned} \quad (1.4)$$

В системе (1.4) функции  $S(E, E_1)$  и  $S(E, E_2)$  представляют собой энергетическое распределение поглощённой энергии в детекторе. Указанные

функции определяются энергией фотонов, энергетическим спектром рентгеновского излучения, материалом и размерами детектора.

Система (1.4) является системой интегрально-параметрических уравнений относительно параметров  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ , которые логично назвать параметрами МДЭ.

Недостатком системы (1.4) является то, что сигналы  $\mathbf{I}_1$  и  $\mathbf{I}_2$  для малых значений параметров МДЭ  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  отличаются в десятки и сотни раз от сигналов для больших значений параметров МДЭ. Для устранения указанного недостатка в большей части работ [29–34], посвящённых МДЭ, для нахождения параметров МДЭ используют логарифмирование системы (1.4).

$$y_1 = -\ln \frac{I_1}{I_{01}} = -\ln \frac{\int_0^{E_1} S(E, E_1) e^{-Af_c(E) - Bf_p(E)} dE}{\int_0^{E_1} S(E, E_1) dE} \quad (1.5)$$

$$y_2 = -\ln \frac{I_2}{I_{02}} = -\ln \frac{\int_0^{E_2} S(E, E_2) e^{-Af_c(E) - Bf_p(E)} dE}{\int_0^{E_2} S(E, E_2) dE}.$$

В системе (1.5)  $\mathbf{I}_{01}$  и  $\mathbf{I}_{02}$  – сигналы детекторов без ОК.

Существенным достоинством системы (1.5), помимо снижения диапазона трансформированного сигнала, является прозрачная физическая трактовка всех этапов обработки первичных радиографических изображений и ясное толкование всех достоинств МДЭ в монохроматической его реализации.

Параметры МДЭ связаны с характеристиками ОК следующими соотношениями [28, 33–38]

$$A(\rho H, Z) = \rho H, \quad B(\rho H, Z) = \rho H Z. \quad (1.6)$$

Из соотношений вытекает возможность оценки эффективного атомного номера  $Z$

$$Z = B/A. \quad (1.7)$$

Совокупность выражений (1.4)–(1.7) определяет способ измерения эффективного атомного номера материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов методом дуальных энергий и, соответственно, является основой одного из наиболее востребованных и эффективных способов распознавания материалов – способа распознавания по эффективному атомному номеру [35, 39–42].

Следует отметить, что способ распознавания по эффективному атомному номеру, основанный на системах уравнений (1.4) или (1.5), предполагает наличие аналитических описаний ЛКО распознаваемых материалов и материалов детекторов, энергетических спектров, точных размеров детекторов, точных значений максимальных энергий, то есть предполагает наличие значительного объема предварительной информации. Второй недостаток связан с особенностями математической модели, предполагающей решение системы нелинейных уравнений итерационными методами с многократными вычислениями интегралов [29, 43], что приводит к значительным временным затратам на вычисления и, соответственно, к существенному разнесению по времени процессов формирования исходных радиографических изображений и изображений параметров МДЭ.

Второй подход к распознаванию материалов продемонстрируем на примере монохромной реализации МДЭ. Для моноэнергетических источников гамма-излучения с энергиями  $E_1$  и  $E_2$  система (1.5) примет вид

$$y_1 = \mu(E_1)H, \quad y_2 = \mu(E_2)H. \quad (1.8)$$

После подстановки формулы (1.2) в (1.8) получим

$$\begin{aligned} y_1 &= f_c(E_1)\rho H + f_p(E_1)Z\rho H \\ y_2 &= f_c(E_2)\rho H + f_p(E_2)Z\rho H. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Из анализа выражений (1.9) следует, что для распознавания материалов может быть использован параметр  $Q$

$$Q = \frac{y_2}{y_1} = \frac{f_c(E_2) + Zf_p(E_2)}{f_c(E_1) + Zf_p(E_1)}. \quad (1.10)$$

В данном случае параметр  $Q$  не зависит от массовой толщины ОК, а зависит только от  $Z$ , что и явилось основанием использовать  $Q$  в качестве параметра распознавания (ПР).

Практическое использование параметра  $Q$  для распознавания материалов ОК сводится к разделению всего диапазона изменения  $Q$  на интервалы и сопоставлению измеренного значения ПР с одним из указанных интервалов. В этом случае материал ОК ассоциируется с характерным материалом сопоставленного интервала.

Параметр  $Q$  используется в качестве ПР и для источников рентгеновского излучения [44–49]. Следует отметить, что в этом случае ПР рассматривается как функция от радиационной толщины ОК для низкой энергии –  $Q(y_1)$ . Это означает, что для каждого значения на стадии калибровки строятся интервалы, аналогично описанному выше. В результате формируется набор уровневых линий. Материал исследуемого ОК соотносится с соответствующим классом материалов, если значение  $Q(y_1)$  попадает в интервал между уровневыми линиями этого класса.

Отметим, что в высокоэнергетических ИДК применяются импульсные источники излучения. Два исходных радиографических изображения ОК формируются за одно сканирование. В этой ситуации сопоставимые столбцы изображений формируются за один пакет импульсов излучения, состоящий из  $n$  импульсов. Пакет состоит из  $n_1$  импульсов низкой энергии и  $n_2$  импульсов высокой энергии. Параметр  $p=n_1/n_2$  существенно влияет на качество досмотрового контроля. Максимальная производительность ИДК достигается для соотношения импульсов  $n_1:n_2 = 1:1$ .

В научной литературе не в полной мере решен ряд задач, связанных с проектированием и практическим использованием ИДК с возможностью распознавания материалов различными реализациями МДЭ. Перечислим эти задачи ниже с предварительными пояснениями.

## 1.2 Обоснование задач исследований

Способы распознавания материалов ОК и их фрагментов и реализующие их ИДК зависят от множества параметров. Качественные показатели функционирования ИДК связаны с рядом характеристик.

К параметрам ИДК следует отнести:

- меньшую и большую максимальные энергии излучения;
- число импульсов в пакете и соотношение числа импульсов с меньшей и большей энергиями;
- материал и размеры радиометрических детекторов;
- разрядность аналого-цифровых преобразователей (АЦП);
- энергетические спектры рентгеновского излучения;
- количество фотонов, падающих на фронтальную поверхность единичного радиометрического детектора;
- материалы и диапазон изменения массовых толщин ОК.

Для потребителей основными характеристикам ИДК, по которым оценивается качество разных моделей, являются:

- точность оценки параметров распознавания материалов ( $Z$  или  $Q$ );
- максимальная просвечиваемая толщина по стали;
- контрастная чувствительность;
- обнаружение проволоки без преграды;
- пропускная способность.

Для корректного проектирования ИДК необходима математическая модель, связывающая его параметры и характеристики. Модель должна описывать все этапы трансформации шумов от исходных радиографических изображений до изображений параметров МДЭ или ПР.

В основе упомянутых выше разновидностей способов распознавания материалов ОК и их фрагментов лежат некоторые базовые модели. Эти базовые модели не учитывают некоторые физические эффекты, самым значимым из которых является рассеяние фотонов в объекте досмотрового

контроля или на элементах конструкции ИДК. К негативным факторам относится также эффект послесвечения сцинтилляционных кристаллов. Влияние рассеяния снижают включением в схему ИДК щелевых коллиматоров источника и (или) системы детекторов. Влияние послесвечения частично устраняют подбором сцинтилляторов или введением корректировочной процедуры в алгоритм обработки информации. Для оценки того, насколько близка базовая модель способа распознавания реальному ИДК или насколько близки реальные реализации инспекционно-досмотровых комплексов друг другу необходимы соответствующие критерии адекватности.

Специфика ИДК обуславливает необходимость их работы в режиме «реального времени». Это означает, что временные затраты на обработку первичных радиографических изображений существенно меньше времени формирования изображений. Выше отмечено, что точные алгоритмы решения систем (1.4) и (1.5) отличаются вычислительной сложностью. Существующие упрощенные алгоритмы оценки параметров МДЭ, например, регрессионные уравнения не отличаются высокой точностью [59]. Ситуация осложняется высокой детализацией исходных радиографических изображений  $2000 \times 1000$  точек и более. Следует также отметить, что в последнее время наметилась тенденция применения в досмотровом контроле систем РВТ, в том числе и дополненных методом дуальных энергий. В этом случае объём вычислений возрастает кратно. Из вышесказанного следует необходимость в разработке высокоточных и высокопроизводительных алгоритмов оценки параметров МДЭ.

Одним из путей повышения производительности ИДК является осуществление досмотрового контроля в условиях непрерывного потока транспортных средств. Такой подход предусматривает самостоятельное пересечение транспортом зоны контроля. Существуют ограничения на мощность дозы ионизирующего излучения для обеспечения радиационной безопасности. Данные ограничения делают единственно возможным



сканирование кабины транспортного средства с пониженной мощностью рентгеновского излучения. Отсюда следует необходимость рассмотрения особенностей и границ применимости способа распознавания материалов в условиях малых доз облучения. Работа при небольших интенсивностях излучения особенно актуальна для бетатронов, так как этот простой, надежный и дешевый источник характеризуется существенно меньшей интенсивностью, чем ЛУЭ.

Распознавание материалов методом дуальных энергий позволяет обнаружить несоответствие материала реального структурно обособленного фрагмента материалу, указанному в грузовой таможенной декларации. Такое несоответствие является одним из самых распространённых таможенных правонарушений. К другому виду таких правонарушений относится несоответствие массы фрагмента массе, заявленной в декларации. Без дополнения алгоритмов распознавания специализированным блоком обработки информации, позволяющим оценить массу фрагмента, невозможно установить соответствие фактических и задекларированных значений масс фрагментов ОК.

Исходя из цели, сформулированной во введении, и анализа предварительных пояснений, приведённых выше, вытекает необходимость решения следующих задач:

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.
4. Экспериментально определить границы применимости распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных

энергий для малых доз излучения

5. Разработать алгоритмы оценки массы объекта досмотрового контроля методом высокоэнергетической цифровой радиографии.

## **ГЛАВА 2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ**

Содержание главы базируется на материалах работы [51].

В своей основе инспекционные досмотровые комплексы (ИДК), реализуют метод сканирующей СЦР [52–55].

В ставших классическими ИДК операторами пунктов пропуска анализируются полутонные цифровые радиографические изображения объектов контроля (ОК), не позволяющие распознать материалы ОК и их структурных фрагментов. Для устранения этой проблемы был разработан метод дуальных энергий (МДЭ) [56–59], представляющий собой двух-энергетическую реализацию цифровой радиографии, со специально подобранными максимальными энергиями рентгеновского излучения. Изначально МДЭ был предназначен для уменьшения влияния немоноэнергетичности излучения в рентгеновской вычислительной томографии. Наиболее широко МДЭ в настоящее время используется для распознавания материалов ОК и их фрагментов. Наравне с термином «распознавание материалов» в отечественной и зарубежной научной литературе применяются термины «идентификация материалов» и «дискриминация материалов». Отметим, что все указанные понятия не в полной мере соответствуют их фактическому содержанию, которое применительно к досмотровому контролю сводится к отнесению материалов анализируемых ОК или их фрагментов к одному из некоторых классов материалов.

Разделение материалов ОК на классы и их фактическое содержание определяется основными потребителями ИДК – таможенными и пограничными службами различных государств мира, а также государственными и частными структурами обеспечения безопасности пассажирских и грузовых перевозок. В настоящее время в досмотровом

контроле крупногабаритных объектов используют следующее разделение материалов на классы: органические материалы; минеральные материалы и металлы с небольшим значением эффективного атомного номера; материалы со средним значением эффективного атомного номера; материалы с большим значением эффективного атомного номера. С каждым классом материалов соотносят наиболее типичный его представитель, и именно совокупность типичных материалов используется, как правило, для изготовления соответствующих тестовых объектов.

Разделение материалов на классы, упомянутое выше, осуществляется по некоторому параметру распознавания (ПР). Выделяют два ПР, с каждым из которых связывают соответствующую реализацию МДЭ [59–62]. В первой реализации в качестве ПР выступает эффективный атомный номер материала, а во второй реализации – некоторая достаточно сложная функция от двух аргументов: эффективного атомного номера и массовой толщины анализируемого объекта или его фрагмента. Первую реализацию МДЭ называют измерением эффективного атомного номера материала ( $Z$ ), а вторую – методом линий уровней.

В любой из реализаций МДЭ на первом этапе формируются два цифровых радиографических изображения для двух максимальных энергий рентгеновского излучения. Выбор пары максимальных энергий рентгеновского излучения осуществляется исходя из главного требования – разделения двух физических эффектов взаимодействия фотонного излучения с веществом. Для высокоэнергетического рентгеновского излучения речь идёт об эффекте Комптона и эффекте образования пар. На втором этапе того или иного способа распознавания формируется изображение соответствующего распределения ПР. Качество ИДК с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов характеризуется несколькими параметрами. Среди этих параметров при описании конкретного ИДК упоминают разрешение по эффективному атомному номеру и производительность комплекса. Под разрешением по эффективному

атомному номеру понимается некоторая разность оценок эффективных атомных номеров материалов ОК или их фрагментов, обнаруживаемая с заданной доверительной вероятностью инспекционным досмотровым комплексом. Предельный уровень доверительной вероятности задаётся потребителем ИДК. Не менее важной характеристикой ИДК является точность определения конкретного ПР. Указанная характеристика зависит от диапазонов изменения эффективных атомных номеров и размеров фрагментов ОК, от максимальных энергий источников высокоэнергетического рентгеновского излучения, от геометрических характеристик схемы контроля, от интенсивности излучения источника и т.д.

В научной литературе недостаточно данных для корректной оценки качества распознавания материалов ОК и их фрагментов как для метода, основанного на измерении  $Z$ , так и для метода линий уровней. Ещё одной важной проблемой, связанной с оценкой качества распознавания материалов ОК высокоэнергетическим методом дуальных энергий, является выяснение адекватности математических моделей ИДК с функцией распознавания материалов.

### **2.1 Оценка погрешности определения параметров распознавания высокоэнергетическим методом дуальных энергий**

Выше отмечено, что для распознавания веществ ОК и их фрагментов с помощью МДЭ используются различные варианты двух основных подходов [59]. В первом подходе в качестве ПР применяется эффективный атомный номер материала ОК. Во втором подходе [59] формируется изображение ПР. Значения ПР в любой точке идентификационного изображения сравниваются с некоторыми линиями уровней для характерных материалов. Если значение ПР попадает в диапазон между нижней и верхней линиями уровней для некоторого класса материалов, то принимается, что материал ОК относится к этому классу. Методы распознавания материалов по  $Z$  и методом линий уровней значительно отличаются по объему используемой предварительной

информации, а также по алгоритмам обработки исходных радиографических изображений, и, следовательно, по сложности вычислений, которая определяет скорость обработки информации в МДЭ. Из сказанного выше следует необходимость рассмотрения общности и специфики математических моделей различных способов распознавания материалов ОК методом МДЭ.

### **2.1.1 Общая часть способов распознавания материалов методом дуальных энергий**

На выходе ИДК с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов максимальным энергиям рентгеновского излучения  $E_i$ ,  $i=1,2$  соответствуют исходных радиографические изображения  $\mathbf{J}_1$  и  $\mathbf{J}_2$ . Физическое толкование исходных радиографических изображений – распределение поглощенной энергии первичного ослабленного рентгеновского излучения по множеству точек изображения  $S$ .

Выше подчеркнута, что важнейшим параметром, характеризующим качество распознавания материалов, является погрешность оценки ПР. Очевидно, что эта погрешность связана с уровнями шумов в исходных радиографических изображениях. Целью раздела 2.1 является разработка математической модели ИДК с функцией распознавания материалов. Математическая модель должна описывать взаимную связь анализируемой потребительской характеристики с параметрами ИДК. Исследуем подробно последовательную трансформацию шумов в процессе поэтапной обработки исходных радиографических изображений.

Оценим уровни шумов в исходных радиографических изображениях  $\mathbf{J}_1$  и  $\mathbf{J}_2$ . В качестве источников высокоэнергетического рентгеновского излучения применяются бетатроны и линейные ускорители электронов, а расстояние от источника излучения до регистратора в десятки раз больше размера излучающей поверхности, поэтому, не теряя общности, можно считать источник рентгеновского излучения точечным и изотропным.

Регистратор рентгеновского излучения представляет собой линейку отдельных радиометрических детекторов. Пусть чувствительный объем единичного радиометрического детектора имеет форму прямоугольного параллелепипеда, центральная ось которого ориентирована на излучающую точку. Чувствительный объем единичного детектора имеет размер  $h_d$  в направлении распространения пучка рентгеновского излучения, а в перпендикулярной плоскости –  $a_d \times b_d$ . Фокусное расстояние от излучающей точки до передней поверхности чувствительного объема детектора равно  $F$ .

У всех источников высокоэнергетического рентгеновского излучения максимальная энергия рентгеновского излучения  $E$  регулируется и может изменяться от  $E_{\min}$  до  $E_{\max}$ . Бетатроны и линейные ускорители электронов являются импульсными источниками рентгеновского излучения. Пусть  $\nu$  – частота импульсов источника. Источник рентгеновского излучения характеризуют мощностью поглощенной дозы или экспозиционной дозы в воздухе на расстоянии 1 м для  $E_{\max}$  –  $P_{0\max}$ .

Исходные радиографические изображения в МДЭ могут быть сформированы последовательно одно за другим или одновременно. Одновременность обусловлена способностью систем управления бетатроном или линейным ускорителем задавать последовательность чередующихся импульсов с максимальными энергиями  $E_1$  и  $E_2$ ,  $E_{\min} < E_1 < E_2 < E_{\max}$ . Причём чередование импульсов низкой максимальной энергии с импульсами высокой максимальной энергии может происходить по какому угодно закону. Под пакетом импульсов будем понимать совокупность последовательных импульсов рентгеновского излучения, необходимых для условно одновременного формирования соответствующих друг другу единичных строк исходных теневого радиационных изображений  $\mathbf{J}_1$  и  $\mathbf{J}_2$ .

Для импульсных источников рентгеновского излучения, которыми являются бетатроны и линейные ускорители, можно измерять время в периодах следования импульсов –  $1/\nu$ , то есть импульс – единица измерения времени. Пусть количество импульсов в пакете равно  $n$ . Оно равно сумме

импульсов с энергией  $E_1 - n_1$  и импульсов с энергией  $E_2 - n_2$ . Напомним, что за время  $n$  формируется по одной строке каждого из исходных радиографических изображений или одна строка идентификационного изображения. Здесь идентификационное изображение – это распределение оценки эффективного атомного номера  $Z$  или параметра распознавания метода линий уровней  $Q$  по множеству  $S$ . Значение  $n$  при фиксированной частоте импульсов источника излучения, однозначно определяет производительность досмотрового контроля. Максимальная производительность ИДК с функцией распознавания веществ ОК и его фрагментов достигается для следующего соотношения импульсов в пакете –  $n_1=1, n_2=1$ . Известно, что для бетатронов с регулируемой максимальной энергией из неравенства  $E_1 < E_2$  следует неравенство  $P_0(E_1) < P_0(E_2)$ . Отсюда следует обоснованность выдвижения на практике требования к соотношению импульсов высокой и низкой максимальных энергий рентгеновского излучения –  $n_2 < n_1$ . Введём параметр  $p = n_1/n_2$ . Если являются известными параметр  $p$  и количество импульсов в пакете импульсов  $n$ , то  $n_2 = n/(1+p)$  и  $n_1 = np/(1+p)$ .

Введём ещё один параметр, который должен представлять интерес для потребителя. Этим параметром является количество пикселей  $M$ , соответствующее минимальному по площади фрагменту ОК, материал которого распознается методом дуальных энергий с заданной доверительной вероятностью.

Для каждого источника высокоэнергетического рентгеновского излучения с регулируемой максимальной энергией известна функция  $W$ , которая описывает функциональную зависимость характеристики источника рентгеновского излучения  $P_0$  от текущего значения максимальной энергии  $E$ . Пусть указанная зависимость в максимально обобщённом виде описывается выражением

$$P_0(E) = P_{0\max} W(E, E_{\max}). \quad (2.1)$$



Для источников высокоэнергетического рентгеновского излучения ( $E_{\max} > 2$  МэВ) функция  $W(E, E_{\max})$  является обычно гладкой возрастающей функцией, например, для описания мощности поглощенной дозы бетатронов [63] используется степенная зависимость с показателем степени равным 3

$$W(E, E_{\max}) = (E/E_{\max})^3.$$

Для конкретного источника рентгеновского излучения показатель степени может быть экспериментально уточнён.

Шумы в исходных радиографических изображениях имеют в значительной степени квантовую природу, то есть шумы каждого пиксела изображения определяются числом фотонов, испытавших взаимодействие с чувствительным объёмом единичного радиометрического детектора. Исходя из этого представляют интерес два числа –  $N_{01}$  и  $N_{02}$ . Здесь  $N_{0i}$ ,  $i=1,2$  – число фотонов рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ , пересекающих фронтальную поверхность чувствительного объёма единичного детектора в единицу времени в случае отсутствия ОК. Величины  $N_{01}$  и  $N_{02}$  оцениваются с помощью формулы

$$N_{0i} \approx \frac{CP_{0\max} W(E_i, E_{\max}) a_d b_d}{E_i \nu F^2 \int_0^{E_i} E f(E, E_i) \mu_{\text{ab air}}(E) dE}, \quad (2.2)$$

где  $C$  – коэффициент перевода характеристики источника высокоэнергетического рентгеновского излучения  $P_{0\max}$  к размерности МэВ/с;  $f(E, E_i)$  – числовой энергетический спектр рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ ;  $\mu_{\text{ab air}}(E)$  – линейный коэффициент поглощения фотонного излучения с энергией  $E$  в воздухе.

Рассмотрим фрагмент ОК массовой толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером материала  $Z$ . В этом случае число фотонов  $N_i(\rho H, Z)$  рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ , не испытавших взаимодействие с ОК и зарегистрированных радиометрическим детектором в единицу времени, определяется с помощью приближённого выражения

$$N_i(\rho H, Z) \approx N_{0i} \int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu_d(E)h_d}] dE, \quad (2.3)$$

где  $m(E, Z)$  – МКО фотонного излучения с энергией  $E$  веществом ОК;  $\mu_d(E)$  – ЛКО фотонного излучения с энергией  $E$  материалом чувствительного объёма детектора.

Для высокоинтенсивных импульсных источников рентгеновского излучения единственным приемлемым режимом регистрации излучения является интегральный режим. Поэтому формула для оценки радиометрического сигнала за ОК толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером  $Z - I_i(\rho H, Z)$ ,  $i=1,2$  без учёта темновых токов радиометрических детекторов имеет вид

$$I_i(\rho H, Z) = N_i(\rho H, Z) \overline{E_{i\text{ab}}(\rho H, Z)}, \quad (2.4)$$

где  $\overline{E_{i\text{ab}}(\rho H, Z)}$  – среднее значение поглощённой энергии зарегистрированного фотона для рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$  за ОК. Значения  $\overline{E_{i\text{ab}}(\rho H, Z)}$  находятся следующим образом

$$\overline{E_{i\text{ab}}(\rho H, Z)} = \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{\text{ab}}(E)} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}, \quad (2.5)$$

где  $\overline{E_{\text{ab}}(E)}$  – среднее значение энергии зарегистрированного фотона с энергией  $E$  [64].

Выражение (2.5) в научной литературе часто записывается через линейный коэффициент поглощения, что является излишне грубым приближением, так в этом случае не учитывается утечка вторичных фотонов и электронов, что особенно значимо для высокоэнергетического рентгеновского излучения и детекторов с малыми чувствительными объёмами.

Дисперсии радиометрических сигналов  $I_i(\rho H, Z) - DI_i(\rho H, Z)$ ,  $i=1,2$  вычисляются по формуле [64]

$$DI_i(\rho H, Z) = n_i N_i(\rho H, Z) \overline{E_{i\text{ab}}^2(\rho H, Z)} = n_i N_i(\rho H, Z) \overline{E_{i\text{ab}}(\rho H, Z)}^2 \eta_i^2(\rho H, Z), \quad (2.6)$$

где  $\overline{E_{i\text{ab}}^2(\rho H, Z)}$  и  $\eta_i^2(\rho H, Z)$  – средние значения квадрата поглощённой энергии зарегистрированных фотонов и коэффициента накопления флуктуаций для рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$  за анализируемым объектом контроля. Формула для вычисления  $\overline{E_{i\text{ab}}^2(\rho H, Z)}$  имеет вид, аналогичный (2.5),

$$\overline{E_{i\text{ab}}^2(\rho H, Z)} = \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{\text{ab}}^2(E)} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}, \quad (2.7)$$

где  $\overline{E_{\text{ab}}^2(E)}$  – среднее значение квадрата энергии зарегистрированного фотона с энергией  $E$ , которое может быть вычислено, например, с помощью формул из [64].

После подстановки (2.3) и (2.7) в формулу (2.6) получим выражение, связывающие дисперсию  $DI_i(\rho H, Z)$  с числом импульсов  $n_i$ .

$$DI_i(\rho H, Z) = N_i(\rho H, Z) n_i \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{\text{ab}}^2(E)} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}. \quad (2.8)$$

На следующем этапе рассмотрим процесс трансформации шумов при формировании из исходных изображений  $\mathbf{J}_i$  результирующих радиографических изображений  $\mathbf{R}_i = \{R_i(x, y) : (x, y) \in S\}$ .

Трансформация исходных радиографических изображений  $\mathbf{J}_i$  в результирующие радиографические изображения  $\mathbf{R}_i$  состоит из нескольких последовательных преобразований. К последовательности преобразований относятся калибровка по «чёрному», калибровка по «белому», нормировка на сигнал с опорного детектора и логарифмирование откалиброванных и нормированных сигналов. Калибровка по «чёрному» сводится к вычитанию средних значений уровней фона радиометрических детекторов  $J_b$ . Можно

считать  $J_b$  для детекторов детерминированными величинами. При калибровке по «белому» сигналы с измерительных детекторов нормируются на сигналы, полученные без объекта контроля,  $I_{0i}=J_{0i}-J_b$ . Трансформация исходных радиометрических сигналов  $J_i(x,y)$  в  $I_i(x,y)$ , а затем в  $R_i(x,y)$  описывается следующей формулой

$$R_i(x,y) = -\ln \frac{J_i(x,y) - J_b}{J_{0i} - J_b} = -\ln \frac{I_i(x,y)}{I_{0i}}. \quad (2.9)$$

Значения  $R_i(x,y)$  численно равны радиационным длинам объекта контроля для рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$  по линии, соединяющей излучающую точку и точку детектирования с координатами  $(x,y)$ , единица измерения – длина свободного пробега (д.с.п.).

Дисперсии  $R_1$  и  $R_2$  оцениваются с помощью разложения выражения (2.9) по малым приращениям. Конечные выражения для приближенной оценки дисперсий  $DR_1(\rho H, Z)$  и  $DR_2(\rho H, Z)$  для ОК толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером  $Z$  имеют вид

$$DR_i(\rho H, Z) = \frac{DI_i(\rho H, Z)}{I_i^2(\rho H, Z)} + \frac{DI_i(0,0)}{I_i^2(0,0)}, \quad (2.10)$$

здесь  $I_i(0,0)$ ,  $DI_i(0,0)$  – значение сигнала и дисперсия сигнала в случае отсутствия ОК.

С учётом формул (2.4), (2.8) выражение (2.10) будет выглядеть следующим образом

$$DR_i(\rho H, Z) = \frac{\tau_i(\rho H, Z)}{n_i}, \quad (2.11)$$

$$\tau_i(\rho H, Z) = \frac{\eta_i^2(\rho H, Z)}{N_i(\rho H, Z)} + \frac{\eta_i^2(0,0)}{N_i(0,0)},$$

здесь  $N_i(0,0)$ ,  $\eta_i(0,0)$  – количество фотонов, зарегистрированных детектором, и коэффициент накопления флуктуаций без ОК.

Калибровка по белому на практике осуществляется по большому количеству строк изображения  $k_0$ , поэтому оценки параметров  $\tau_i$  находятся с помощью выражения

$$\tau_i(\rho H, Z) = \frac{\eta_i^2(\rho H, Z)}{N_i(\rho H, Z)} + \frac{\eta_i^2(0,0)}{k_0 N_i(0,0)}, \quad (2.12)$$

здесь  $\overline{N_i(0,0)}$  – среднее числа фотонов, зарегистрированных детектором без ОК. При больших значениях  $k_0$  второе слагаемое в суммах (2.11), (2.12) можно не учитывать.

На следующем этапе дальнейшие трансформации уровней шумов зависят от алгоритмов обработки информации.

Выражения для оценки дисперсий  $\mathbf{R}_1(\rho H, Z)$  и  $\mathbf{R}_2(\rho H, Z)$  для ОК толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером  $Z$  (2.10), (2.11) выведены без учёта нестабильности пучка импульсного рентгеновского излучения. Нестабильность в данном случае означает то, что параметры, характеризующие единичный импульс рентгеновского излучения, являются случайными величинами. Уменьшение влияния нестабильности достигается нормировкой сигналов с измерительных детекторов  $I_i(\rho H, Z)$  на сигналы с опорного детектора  $I_{pi}$ . Сигналы с опорного детектора  $I_{pi}$  не зависят от объекта контроля.

Выражение для оценки дисперсии нормированного сигнала  $I_i(\rho H, Z)/I_{pi} - D(I_i(\rho H, Z)/I_{pi})$  имеет следующий вид

$$D\left(\frac{I_i(\rho H, Z)}{I_{pi}}\right) = \frac{I_{pi}^2 D I_i(\rho H, Z) + I_i^2(\rho H, Z) D I_{pi}}{I_{pi}^4}. \quad (2.13)$$

Выражение (2.13) выведено для условия полной компенсации нестабильности, которое может достигаться только в том случае, если нестабильно только число электронов, сбрасываемых на мишень ускорителя [65]. Более детальные оценки могут быть осуществлены на основе анализа результатов экспериментальных исследований.

Из анализа выражения (2.13) следует, что при выполнении некоторых требований к опорному каналу оценка дисперсий сигналов  $\mathbf{R}_1(\rho H, Z)$  и  $\mathbf{R}_2(\rho H, Z)$  может осуществляться с помощью выражений (2.10), (2.12). Указанные выше требования в формализованном виде выглядят следующим образом

$$I_{pi} \gg I_i(\rho H, Z). \quad (2.14)$$

Физическая реализация ограничения (2.14) сводится к использованию в качестве опорного канала специального выделенного радиометрического детектора, работающего синхронно с измерительными каналами, но отличающегося от них большим количеством зарегистрированных фотонов и меньшим значением коэффициента накопления флуктуаций. Данное отличие достигается применением детектора с большими размерами чувствительного объёма, т.е. реализацией детектора полного поглощения. Опорный детектор должен быть оснащён коллиматором диафрагменного типа с большой степенью коллимации и защищён от рассеянного излучения.

Выражения (2.1)–(2.14) позволяют сделать достаточно точные оценки средних значений и дисперсий исходных и трансформированных радиографических изображений. Указанные выражения определяют общую для всех способов распознавания материалов часть.

Выражения (2.1)–(2.13) также могут быть использованы для имитационного моделирования исходных цифровых радиографических изображений и их последующей трансформации.

Выражения (2.1)–(2.13) выведены без учёта оцифровки аналоговых сигналов. Можно считать, что разрядность аналого-цифровых преобразователей (АЦП) такова, что цена единицы младшего разряда значительно меньше, чем величина шума.

### **2.1.2 Распознавание материалов объектов контроля методом дуальных энергий по эффективному атомному номеру**

В способе распознавания материалов ОК и их фрагментов методом дуальных энергий с использованием в качестве параметра распознавания эффективного атомного номера  $Z$  трансформированные (результатирующие) радиографические изображения  $\mathbf{R}_1$  и  $\mathbf{R}_2$  поступают в блок совместной обработки, на выходе которого получают изображения параметров МДЭ –  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ . В блоке совместной обработки  $\mathbf{R}_1$  и  $\mathbf{R}_2$  для всех точек  $(x, y)$  из

множества  $S$  находится решение нелинейной системы интегрально-параметрических уравнений с целью оценки параметров МДЭ  $A(x,y)$  и  $B(x,y)$ .

Упомянутая система имеет вид

$$\begin{aligned}
 & -\ln \frac{\int_0^{E_1} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-A(x,y)f_c(E)-B(x,y)f_p(E)} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_1} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE} = R_1(x, y) \\
 & -\ln \frac{\int_0^{E_2} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_2) e^{-A(x,y)f_c(E)-B(x,y)f_p(E)} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_2} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_2) [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE} = R_2(x, y),
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

здесь  $f_c(E)$ ,  $f_p(E)$  – энергетические зависимости двух основных процессов взаимодействия фотонного излучения с веществом ОК. Для высокоэнергетического МДЭ превалируют два процесса взаимодействия фотонов с веществом – эффект Комптона (некогерентное рассеяние) и эффект рождения пар. В системе (2.15) эффекту Комптона соответствует функция  $f_c(E)$ , а эффекту рождения пар – функция  $f_p(E)$ .

Существует несколько возможных подходов к решению системы (2.15). Опишем классический подход. Для решения системы нелинейных уравнений (2.15) относительно параметров МДЭ –  $A(x,y)$  и  $B(x,y)$  необходимо знать значения максимальных энергий –  $E_1$  и  $E_2$  и точные описания нескольких энергетических функций. К необходимым энергетическим зависимостям относятся: энергетические спектры  $f(E, E_1)$  и  $f(E, E_2)$ ; энергетические зависимости  $\overline{E_{ab}(E)}$ ,  $f_c(E)$  и  $f_p(E)$ . В литературе имеются аналитические описания энергетических зависимостей среднего значения энергии зарегистрированного фотона [64] и сечений эффектов Комптона и рождения пар, например, [66]. Кроме аналитических зависимостей могут быть использованы интерполяции соответствующих энергетических зависимостей из баз данных по взаимодействию гамма-излучения с веществом [67, 68].

Существенные сложности в формировании предварительной информации для системы нелинейных уравнений (2.15) связаны с точным описанием энергетических спектров высокоэнергетического рентгеновского излучения. В настоящее время широко используется аналитический подход к описанию  $f(E, E_i)$ , основанный на формуле Шиффа [69–71] с поправкой на ослабление в предварительных фильтрах источника высокоэнергетического рентгеновского излучения и поправкой на эффективность регистрации фотонного излучения. Отметим также работу [72], в которой приведено 14 аппроксимаций энергетических спектров высокоэнергетических источников рентгеновского излучения. Большинство из аппроксимаций энергетических спектров из [72] экспериментально проверено на реально действующих ускорителях электронов. Выбор в пользу того или иного описания энергетического спектра применительно к задаче распознавания материалов может быть осуществлён на основе анализа теоретических и экспериментальных кривых ослабления рентгеновского излучения для интересующих нас диапазонов изменения массовой толщины ОК –  $\rho H$  и эффективного атомного номера материалов –  $Z$ . Наиболее рационально при выборе аппроксимации энергетического спектра воспользоваться методом минимальной невязки.

Дисперсии параметров МДЭ, рассматриваемых в качестве случайных величин,  $A$ ,  $B$  –  $DA$  и  $DB$ , а также соответствующая ковариация  $\text{cov}(A, B)$  находятся с помощью подхода, описанного выше, то есть с помощью метода малых приращений [51]. Для ОК толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером  $Z$  конечные выражения для дисперсий  $DA(\rho H, Z)$ ,  $DB(\rho H, Z)$  и ковариации  $\text{cov}(A, B)(\rho H, Z)$  имеют вид [51]

$$\begin{aligned} DA(\rho H, Z) &= \frac{g_{22}^2 DR_1(\rho H, Z) + g_{12}^2 DR_2(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}, \\ DB(\rho H, Z) &= \frac{g_{11}^2 DR_2(\rho H, Z) + g_{21}^2 DR_1(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}, \\ \text{cov}(A, B)(\rho H, Z) &= \frac{-g_{22}g_{21} DR_1(\rho H, Z) - g_{12}g_{11} DR_2(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}. \end{aligned} \quad (2.16)$$



здесь

$$g_{ij} = g_{ij}(\rho H, Z) = \frac{\int_0^{E_i} w_j(E) \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-m(E,Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_{\pi}}] dE}{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-m(E,Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_{\pi}}] dE}, \quad i=1,2; j=1,2$$

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

После подстановки (2.11) в (2.16) получим

$$\begin{aligned} DA(\rho H, Z) &= \frac{g_{22}^2 \tau_1(\rho H, Z)/n_1 + g_{12}^2 \tau_2(\rho H, Z)/n_2}{G^2(\rho H, Z)}, \\ DB(\rho H, Z) &= \frac{g_{11}^2 \tau_2(\rho H, Z)/n_2 + g_{21}^2 \tau_1(\rho H, Z)/n_1}{G^2(\rho H, Z)} \\ \text{cov}(A, B)(\rho H, Z) &= \frac{-g_{22}g_{21} \tau_1(\rho H, Z)/n_1 - g_{12}g_{11} \tau_2(\rho H, Z)/n_2}{G^2(\rho H, Z)}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Заключительный этап трансформации шумов для анализируемого способа распознавания материалов связан с оценкой дисперсии  $Z$ . В области высоких энергий рентгеновского излучения оценка эффективного атомного номера  $Z_V(\rho H, Z)$  связана с параметрами МДЭ следующим соотношением  $A(\rho H, Z)$  и  $B(\rho H, Z)$  [59]

$$Z_V(\rho H, Z) \approx \frac{B(\rho H, Z)}{A(\rho H, Z)}. \quad (2.18)$$

Применяя метод малых приращений к соотношению (2.18) получим для ОК толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером материала –  $Z$  формулу для вычисления дисперсии оценки эффективного атомного номера  $Z_V(\rho H, Z) - DZ_V(\rho H, Z)$

$$DZ_V(\rho H, Z) \approx \frac{A^2 DB(\rho H, Z) + B^2 DA(\rho H, Z) - 2AB \text{cov}(A, B)(\rho H, Z)}{A^4} \quad (2.19)$$

Подставим выражения (2.17) в формулу (2.19). После несложных преобразований выражение для оценки дисперсии эффективного атомного номера будет иметь вид

$$DZ_V(\rho H, Z) \approx \frac{(Ag_{21} + Bg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z)/n_1 + (Ag_{11} + Bg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z)/n_2}{G^2(\rho H, Z)A^4} \quad (2.20)$$

Применительно к анализируемому методу распознавания материала ОК представляет интерес связь дисперсии оцениваемого параметра ОК –  $DZ_V(\rho H, Z)$  с рядом параметров ИДК. К анализируемым параметрам относятся: число импульсов в пакете  $n=n_1+n_2$ ; параметр  $p=n_1/n_2$ ; среднее значением эффективного атомного номера материала ОК –  $Z$ ; массовая толщина ОК –  $\rho H$ . Искомые параметры высокоэнергетической реализации МДЭ –  $A(\rho H, Z)$  и  $B(\rho H, Z)$  связаны с основными характеристиками ОК –  $Z$  и  $\rho H$  следующим образом [59]

$$A(\rho H, Z) = \rho H, \quad B(\rho H, Z) = Z\rho H. \quad (2.21)$$

В результате подстановки (2.21) в (2.20) с учётом  $n_2=n/(1+p)$  и  $n_1=np/(1+p)$  получим

$$DZ_V(\rho H, Z) \approx \frac{(1+p)\left[(g_{21} + Zg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z)/p + (g_{11} + Zg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z)\right]}{nG^2(\rho H, Z)(\rho H)^2}. \quad (2.22)$$

Конечное выражение (2.22) в совокупности с формулами (2.11), (2.12) является основой методики оценки погрешности измерения эффективного атомного номера материала ОК. Это выражение позволяет оценить погрешность измерения эффективного атомного номера вещества ОК, исходя из времени формирования строк исходных радиографических изображений, параметров ОК, максимальных энергий рентгеновского излучения. Погрешность измерения  $\Delta Z$  эффективного атомного номера  $Z$  связана с дисперсией (2.22) известным выражением –  $\Delta Z_V(\rho H, Z) = \sqrt{DZ_V(\rho H, Z)}$ .

Из предварительного анализа выражения (2.22) следует, что существует оптимальное значение параметра  $p$ , при котором значение дисперсии  $DZ_V(\rho H, Z)$  при фиксированных значениях параметров ОК  $Z$  и  $\rho H$  является минимальным. Формула для вычисления  $p_{\text{opt}}$  находится из равенства нулю производной дисперсии  $DZ_V(\rho H, Z)$  по  $p$  и имеет вид

$$p_{\text{opt}}(\rho H, Z) = \frac{g_{21} + Zg_{22}}{g_{11} + Zg_{12}} \sqrt{\frac{\tau_1(\rho H, Z)}{\tau_2(\rho H, Z)}}. \quad (2.23)$$

Минимальное значение дисперсии  $DZ_V(\rho H, Z)$ , соответствующее  $p_{\text{opt}}$ , находится подстановкой (2.23) в (2.22).

Формула (2.22) позволяет вычислить количество импульсов в пакете, необходимое для формирования пары строк изображений  $\mathbf{I}_1$  и  $\mathbf{I}_2$ , исходя из заданного потребителем предельного уровня погрешности оценки эффективного атомного номера  $\Delta Z_{\text{lim}}$ . Выше отмечено, что указанный предельный уровень погрешности оценки эффективного атомного номера  $\Delta Z_{\text{lim}}$  называют разрешением по  $Z$ . Искомое выражение имеет вид

$$n(\rho H, Z) \approx \frac{(1+p) \left[ (g_{21} + Zg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z) / p + (g_{11} + Zg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z) \right]}{G^2(\rho H, Z)(\rho H)^2 \Delta Z_{\text{lim}}^2}. \quad (2.24)$$

Выражения (2.20)–(2.22), (2.24) выведены для случая, в котором оценка эффективного атомного номера вещества ОК или его фрагмента  $Z_V(\rho H, Z)$  производится для одной точки идентификационного изображения (одного пикселя). На практике изображение минимального фрагмента, задаваемого потребителем, состоит из  $M$  пикселей,  $M \gg 1$ . В связи с этим, в качестве ПР логично использовать среднее значение оценки эффективного атомного номера –  $\overline{Z_V(\rho H, Z)}$ . Дисперсия оценки среднего  $\overline{DZ_V(\rho H, Z)}$  находится по формуле

$$\overline{DZ_V(\rho H, Z)} = \frac{DZ_V(\rho H, Z)}{M}. \quad (2.25)$$

С учётом (2.25) все полученные ранее формулы (2.20-2.22, 2.24) корректируются введением в правой части дополнительного множителя, равного  $1/M$ .

Производительность ИДК с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов анализируемым способом существенным образом зависит от массовой толщины ОК  $\rho H$ . Неопределённость внутренней структуры объектов досмотрового контроля ставит заказчиков и конечных потребителей ИДК перед некоторой сложной дилеммой. Указанная дилемма связана с

проблемой выбора и сводится к ответу на вопрос – что предпочесть – высокую производительность ИДК с качественным распознаванием материалов ОК и их фрагментов с небольшой массовой толщиной или низкую производительность ИДК с качественным распознаванием материалов ОК и их фрагментов со значительной массовой толщиной.

### **2.1.3 Распознавание материалов объектов контроля и их фрагментов методом линий уровней**

Вторая реализация распознавания материалов ОК и их фрагментов с помощью МДЭ называется методом линий уровней [59]. Это связано с графической иллюстрацией анализируемого способа, в котором ПР –  $Q$  в каждой точке изображения равен отношению яркостей изображений  $\mathbf{R}_2$  и  $\mathbf{R}_1$ , и значение ПР может располагаться в одной из полос, соответствующих определённому классу материалов. Указанные полосы и ограничиваются линиями уровней. Количество полос и соответствующее количество линий уровней определяются разбиением всей совокупности материалов на классы. В формализованном виде в анализируемой реализации способа распознавания материалов на основе результирующих изображений  $\mathbf{R}_1$  и  $\mathbf{R}_2$  строится изображение ПР

$$\mathbf{Q} = \left\{ Q(i, j) = \frac{R_2(i, j)}{R_1(i, j)} : (i, j) \in S \right\}. \quad (2.26)$$

В соответствии со сказанным выше, материал испытываемого объекта либо отдельно выделяемого фрагмента его структуры в точке с координатами  $(i, j)$  идентифицируется некоторым классом материалов, если выполняется следующее ограничение

$$U_-(R_1(i, j)) < Q(R_1(i, j)) \leq U_+(R_1(i, j)), \quad (2.27)$$

где  $U_-(i, j)$ ,  $U_+(i, j)$  – линии уровня «снизу» и «сверху» для сопоставляемого класса материалов.

Запись параметра распознавания  $Q$  в виде зависимости  $Q(R_1(i, j))$ , то есть зависимости ПР от радиационной толщины ОК для «низкой» энергии

обосновывается необходимостью сравнения значения ПР для разных классов материалов с соблюдением «равных» условий. Так как для «низкой» энергии, как правило, эффект Комптона абсолютно превалирует перед остальными эффектами взаимодействия фотонов с веществом, то «равность» условий достигается близостью радиационных толщин ОК из различных материалов для «низкой» энергии.

Для ОК или их фрагментов толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером материала  $Z$  дисперсия ПР  $Q(\rho H, Z) - DQ(\rho H, Z)$  находится с помощью разложения по малым приращениям

$$DQ(\rho H, Z) = \frac{R_1^2(\rho H, Z)DR_2(\rho H, Z) + R_2^2(\rho H, Z)DR_1(\rho H, Z)}{R_1^4(\rho H, Z)}. \quad (2.28)$$

После подстановки формул (2.10), (2.11) в выражение (2.28) с учётом  $n_2 = n/(1+p)$  и  $n_1 = np/(1+p)$  получим

$$DQ(\rho H, Z) = \frac{(1+p)[R_1^2(\rho H, Z)\tau_2(\rho H, Z) + R_2^2(\rho H, Z)\tau_1(\rho H, Z)/p]}{nR_1^4(\rho H, Z)}. \quad (2.29)$$

Совокупность выражений (2.3), (2.9), (2.11) и (2.29) позволяет оценить погрешность ПР методом линий уровней –  $\Delta Q(\rho H, Z) = \sqrt{DQ(\rho H, Z)}$ .

Как и для способа распознавания по  $Z$  существует значение  $p$ , для которого дисперсия  $DQ(\rho H, Z)$  достигает минимума. Значение параметра  $p - p_{\text{opt}}(\rho H, Z)$ , для которого значение  $DQ(\rho H, Z)$  минимально, находится из условия равенства нулю производной анализируемой дисперсии по  $p$  и вычисляется по формуле

$$p_{\text{opt}}(\rho H, Z) = \frac{R_2(\rho H, Z)}{R_1(\rho H, Z)} \sqrt{\frac{\tau_1(\rho H, Z)}{\tau_2(\rho H, Z)}}. \quad (2.30)$$

Минимальное значение дисперсии  $DQ(\rho H, Z)$  находится подстановкой (2.30) в выражение (2.29).

Общее количество импульсов  $n$ , определяющее производительность досмотрового комплекса с распознаванием вещества ОК методом линий

уровней, находится из (2.29), исходя из предельного уровня погрешности оценки параметра распознавания  $\Delta Q_{\text{lim}}$ ,

$$n(\rho H, Z) = \frac{(1 + p)[R_1^2(\rho H, Z)\tau_2(\rho H, Z) + R_2^2(\rho H, Z)\tau_1(\rho H, Z)/p]}{R_1^4(\rho H, Z)\Delta Q_{\text{lim}}^2}. \quad (2.31)$$

Выражения (2.3), (2.9), (2.11), (2.31) позволяют оценить производительность досмотрового комплекса с функцией распознавания веществ ОК методом линий уровней.

#### 2.1.4 Примеры расчёта $\Delta Z_V$ и $\Delta Q$

Выше приведены основы методики оценки погрешности определения ПР для двух базовых реализаций способа распознавания материалов ОК и их фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий. Для иллюстрации применимости указанных алгоритмов на практике была осуществлена серия расчётов  $\Delta Z_V$  и  $\Delta Q$  для двух пар максимальных значений рентгеновского излучения – «низкой» и «высокой» энергии –  $E_1=4,5$  МэВ,  $E_2=7,5$  МэВ и  $E_1=4,5$  МэВ,  $E_2=9$  МэВ. Значения массовых толщин ОК  $\rho H$  варьировались в диапазоне от 10 до 120 г/см<sup>2</sup>, а эффективный атомный номер  $Z$  принимал значения 6, 13, 26 и 82. Расчёты проводили для малогабаритного бетатрона МИБ-9 с характеристиками:  $E_{\text{max}}=9$  МэВ;  $P_{0\text{max}}=20$  Р/мин;  $\nu=200$  импульсов в секунду. Геометрическая схема досмотрового контроля характеризовалась следующими параметрами: фокусное расстояние  $F=4,2$  м; радиометрические детекторы на основе сцинтиллятора из вольфрамата кадмия ( $\text{CdWO}_4$ ) толщиной  $h_d=30$  мм и поперечными размерами  $a_d \times b_d = 5 \times 6$  мм<sup>2</sup>. Число импульсов для низкой энергии  $n_1 = 3$ , а для высокой энергии –  $n_2=1$ . Минимальное количество пикселей в проекции на изображающую поверхность надёжно идентифицируемого фрагмента –  $M=16$ .

В таблицах 2.1 и 2.2 сведены результаты расчётов  $\Delta Z_V$  и  $\Delta Q$  для различных массовых толщин  $\rho H$  и различных материалов ОК.

Таблица 2.1 – Зависимость среднеквадратичного отклонения оценки параметра распознавания  $\Delta Z_V$  от  $\rho H$

Материал	$E_1 - E_2$ , МэВ	$\rho H$ , г/см <sup>2</sup>											
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
С (Углерод)	4,5 – 7,5	11,2	6,6	5,1	4,5	4,2	4,2	4,2	4,3	4,5	4,7	5,0	5,4
	4,5 – 9	5,6	3,3	2,6	2,3	2,2	2,1	2,2	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8
Al (Алюминий)	4,5 – 7,5	11,4	6,8	5,3	4,7	4,5	4,4	4,5	4,6	4,8	5,1	5,5	5,9
	4,5 – 9	5,8	3,4	2,7	2,5	2,3	2,3	2,4	2,4	2,6	2,7	2,9	3,2
Fe (Железо)	4,5 – 7,5	12,0	7,2	5,8	5,3	5,1	5,1	5,2	5,4	5,8	6,2	6,8	7,4
	4,5 – 9	6,1	3,8	3,1	2,8	2,7	2,7	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,2
Pb (Свинец)	4,5 – 7,5	14,6	9,5	8,3	8,0	8,0	8,6	9,3	10,3	11,6	13,2	15,1	17,5
	4,5 – 9	8,0	5,3	4,7	4,6	4,7	5,1	5,5	6,2	7,0	8,1	9,3	10,8

Анализ данных, приведённых в таблице 2.1, показывает, что погрешность определения  $Z$  более значительна для малых и больших толщин. Погрешность определения  $Z$  уменьшается с ростом большей энергии.

Таблица 2.2 – Зависимость среднеквадратичного отклонения оценки параметра распознавания  $\Delta Q \times 0,01$  от  $\rho H$

Материал	$E_1 - E_2$ , МэВ	$\rho H$ , г/см <sup>2</sup>											
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
С (Углерод)	4,5 – 7,5	1,10	0,81	0,75	0,76	0,79	0,85	0,92	1,01	1,12	1,24	1,39	1,56
	4,5 – 9	0,94	0,69	0,64	0,64	0,66	0,71	0,77	0,85	0,94	1,05	1,17	1,32
Al (Алюминий)	4,5 – 7,5	1,10	0,82	0,76	0,77	0,80	0,86	0,93	1,02	1,13	1,26	1,41	1,58
	4,5 – 9	0,94	0,67	0,65	0,65	0,68	0,73	0,79	0,87	0,96	1,07	1,21	1,36
Fe (Железо)	4,5 – 7,5	1,08	0,83	0,77	0,78	0,82	0,88	0,96	1,06	1,18	1,32	1,49	1,68
	4,5 – 9	0,93	0,71	0,66	0,67	0,70	0,76	0,83	0,92	1,02	1,15	1,30	1,47
Pb (Свинец)	4,5 – 7,5	0,25	0,29	0,33	0,39	0,46	0,54	0,63	0,75	0,89	1,06	1,27	1,51
	4,5 – 9	0,23	0,26	0,30	0,36	0,42	0,49	0,58	0,69	0,82	0,98	1,16	1,39

Из анализа данных таблицы 2.2 следует, что погрешность определения параметра распознавания  $Q$  имеет менее выраженные зависимости от  $\rho H$  и большей максимальной энергии, чем погрешность оценки  $Z$ .

### 2.1.5 Экспериментальные исследования

Для подтверждения работоспособности алгоритмов, предназначенных для оценки погрешности ПР материалов ОК и их фрагментов с помощью различных реализаций МДЭ, была проведена серия экспериментальных исследований на ИДК Томского политехнического университета. Тестовый

объект (ТО), состоящий из фрагментов с различной массовой толщиной из органических материалов, алюминия, железа и свинца, сканировали узкими веерными пучками рентгеновского излучения с максимальными энергиями  $E_1=4,5$  МэВ,  $E_2=9$  МэВ. Условия экспериментов отличались от условий расчётных примеров только мощностью дозы экспозиционной дозы –  $P_{0max}=5$  Р/мин. Указанная мощность была выбрана для обеспечения устойчивой и стабильной работы бетатрона в течение длительного времени. На рисунках 2.1 и 2.2 приведены результаты сопоставления экспериментальных и расчётных зависимостей  $\Delta Z_V(\rho H)$  и  $\Delta Q_V(\rho H)$ .

Из анализа данных, представленных на рисунках 2.1 и 2.2 следует, что в исследуемом диапазоне изменения массовых толщин ОК экспериментальные оценки погрешности определения параметров распознавания МДЭ либо близки к расчётным значениям, либо меньше их. Это доказывает применимость предлагаемых алгоритмов для оценки погрешности определения эффективного атомного номера и ПР метода линий уровней на практике.

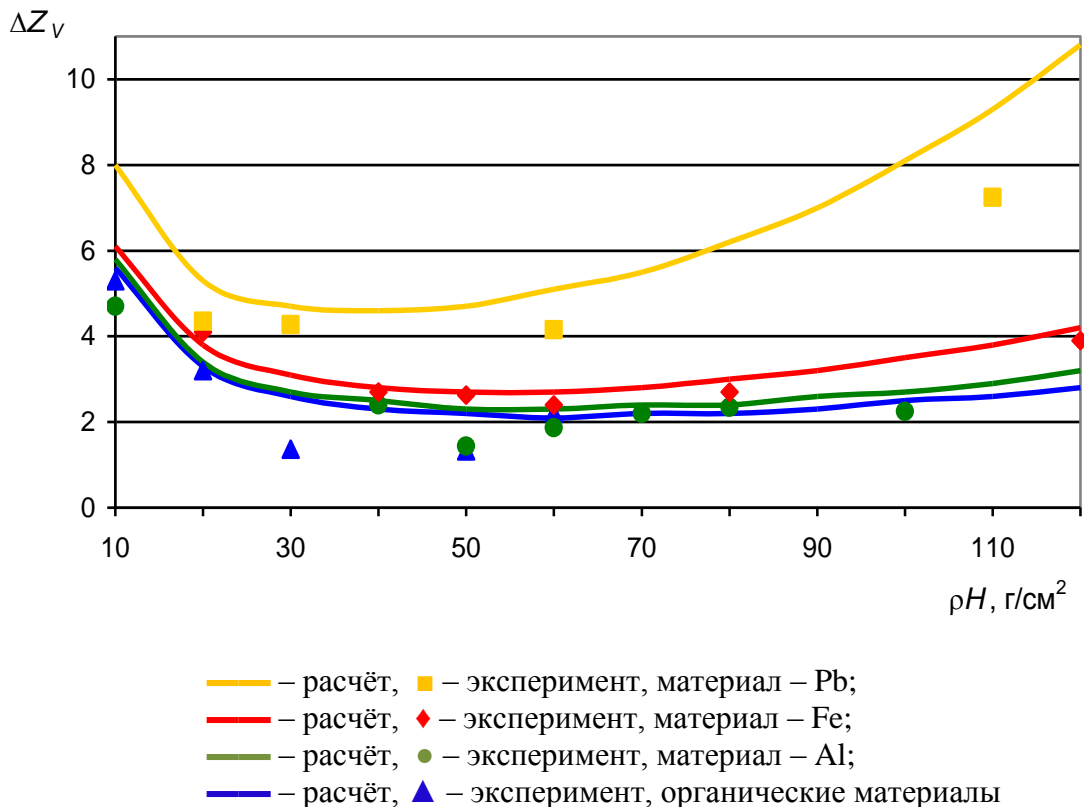
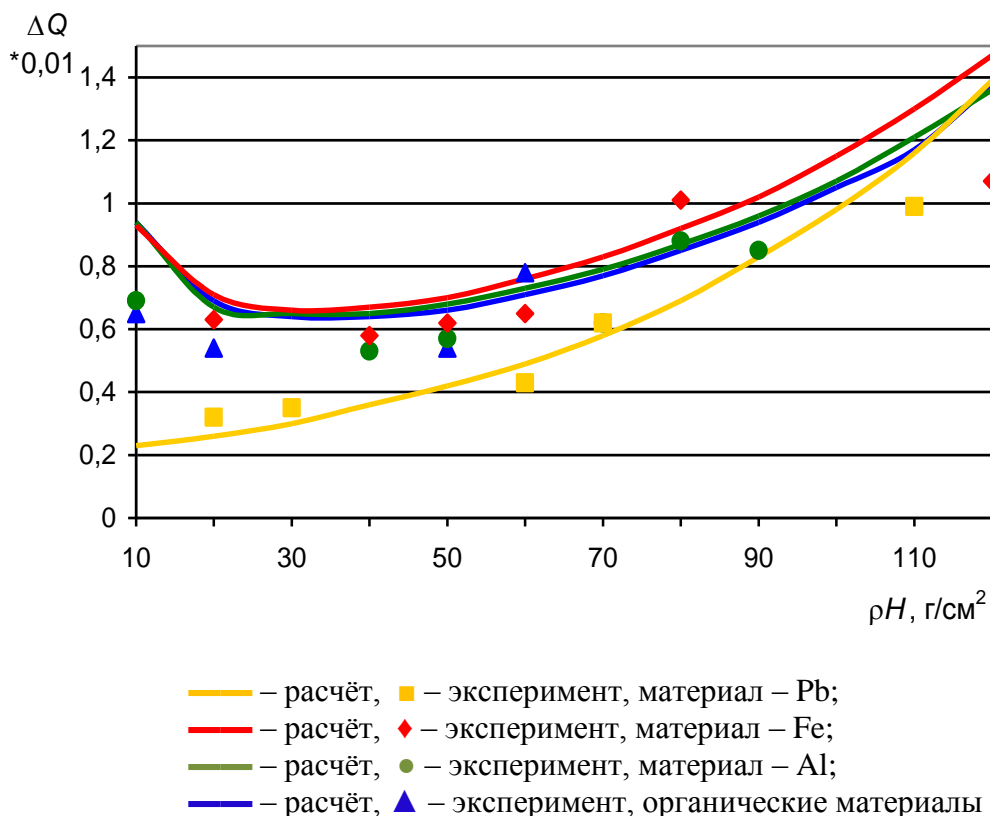


Рисунок 2.1 – Расчётные и экспериментальные зависимости  $\Delta Z_V(\rho H)$



Рисунок 2.2 – Расчетные и экспериментальные зависимости  $\Delta Q(\rho H)$ 

### 2.1.6 Выбор соотношения импульсов в пакете

Выше показано, что погрешность определения ПР в анализируемых реализациях МДЭ существенным образом зависит от значения  $p$ . Параметр  $p$  равен отношению количества импульсов с меньшей (низкой) максимальной энергий рентгеновского излучения в пакете импульсов к количеству импульсов с большей (высокой) максимальной энергий. Доказано существование оптимальных значений параметра  $p$  –  $p_{\text{opt}}$ , для которых значения дисперсий ПР минимальны.

Параметр  $p_{\text{opt}}$  для параметра распознавания  $Z$  вычисляется с помощью формулы (2.23), а для ПР  $Q$  – с помощью выражения (2.30). Проведена серия расчётов зависимостей  $p_{\text{opt}}(\rho H, Z)$  для ПР  $Z$  и  $Q$  для условий расчётного примера из раздела 2.2. В таблице 2.3 приведены зависимости  $p_{\text{opt}}(\rho H)$  для объектов из углерода, алюминия, железа и свинца.

Из анализа данных, представленных в таблице 2.3, можно сделать ряд выводов. Первый вывод – с возрастанием массовой толщины объекта  $\rho H$

значения  $p_{opt}$  при распознавании и по  $Q$ , и по  $Z$  возрастают. Вторым выводом – значения  $p_{opt}$  при распознавании по  $Q$  практически близки к аналогичным значениям  $p_{opt}$  при распознавании по  $Z$ , расхождение не более 10 %. Третьим выводом – значения  $p_{opt}$  при использовании пары максимальных энергий 4,5 – 9 МэВ всегда больше значений  $p_{opt}$  при использовании пары максимальных энергий 4,5 – 7,5 МэВ. Можно сделать следующие рекомендации по применению таблицы 2.3. Количество импульсов в пакете  $n$  выбирается по формулам (2.24) или (2.31). Количество импульсов большей энергии  $n_2$  – это максимум из двух чисел – ближайшего целого числа к  $n/(1+p_{opt})$  и 1, а в качестве  $n_1$  логично взять максимум ближайшего целого числа к  $np_{opt}/(1+p_{opt})$  и 1.

Таблица 2.3 – Оптимальные значения  $p_{opt}$

Материал	ПИ	$E_1 - E_2$ , МэВ	$\rho H$ , г/см <sup>2</sup>											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
С (Углерод)	Q	4,5 – 7,5	1,31	1,42	1,52	1,61	1,71	1,8	1,89	1,98	2,07	2,16	2,26	2,36
		4,5 – 9	1,45	1,61	1,76	1,9	2,05	2,19	2,34	2,49	2,64	2,79	2,95	3,12
	Z	4,5 – 7,5	1,31	1,41	1,52	1,61	1,71	1,8	1,89	1,99	2,08	2,17	2,27	2,36
		4,5 – 9	1,45	1,61	1,76	1,91	2,06	2,21	2,36	2,51	2,67	2,82	2,99	3,15
Al (Алюминий)	Q	4,5 – 7,5	1,33	1,43	1,53	1,62	1,71	1,79	1,87	1,95	2,03	2,11	2,19	2,27
		4,5 – 9	1,47	1,63	1,78	1,92	2,05	2,19	2,32	2,45	2,58	2,71	2,84	2,98
	Z	4,5 – 7,5	1,34	1,44	1,54	1,63	1,71	1,8	1,88	1,97	2,05	2,13	2,21	2,29
		4,5 – 9	1,5	1,65	1,8	1,95	2,09	2,23	2,36	2,5	2,64	2,77	2,91	3,05
Fe (Железо)	Q	4,5 – 7,5	1,35	1,47	1,56	1,64	1,72	1,79	1,86	1,93	2	2,06	2,12	2,18
		4,5 – 9	1,51	1,69	1,83	1,96	2,08	2,2	2,31	2,42	2,52	2,62	2,73	2,83
	Z	4,5 – 7,5	1,4	1,5	1,59	1,67	1,74	1,82	1,89	1,96	2,03	2,09	2,15	2,22
		4,5 – 9	1,6	1,76	1,9	2,03	2,15	2,28	2,39	2,5	2,62	2,72	2,83	2,94
Pb (Свинец)	Q	4,5 – 7,5	1,84	1,9	1,95	1,99	2,02	2,06	2,08	2,11	2,14	2,16	2,18	2,21
		4,5 – 9	2,3	2,38	2,45	2,52	2,57	2,62	2,66	2,7	2,74	2,78	2,81	2,85
	Z	4,5 – 7,5	1,68	1,8	1,88	1,94	2	2,05	2,09	2,13	2,16	2,2	2,23	2,25
		4,5 – 9	2,09	2,28	2,42	2,52	2,61	2,68	2,75	2,81	2,87	2,92	2,96	3

В разделе 2.1 рассмотрена математическая модель двух основных реализаций способов распознавания материалов методом дуальных энергий, учитывающая всю последовательность трансформации исходных радиографических изображений с учётом шумов. Полученные соотношения

могут быть использованы для оценки некоторых параметров качества ИДК: точности оценки параметров распознавания и производительности контроля.

С качеством ИДК непосредственно связан вопрос: насколько адекватна модель описывающая процесс формирования и обработки информации к реальным условиям? В следующем разделе будет сформулированы подходы к решению указанного вопроса.

## **2.2 Критерии адекватности моделей досмотровых комплексов с функцией распознавание материалов объектов контроля**

Методы дуальных энергий в настоящее время развиваются, в основном, в двух направлениях – применительно к досмотровому контролю и к оценке внутренней структуры ОК методом РВТ в досмотровых томографических комплексах [52, 53, 57, 73–75]. Различные физические и технические факторы существенным образом влияют на качество распознавания веществ объектов контроля как для низкоэнергетического [61], так и для высокоэнергетического рентгеновского излучения [62]. В литературе не в полной мере рассмотрены вопросы, связанные с адекватностью математических моделей сканирующих СЦР с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов. Логично допустить, что критерий адекватности для анализируемых систем главным образом зависит от физической сущности используемого ПР.

Последующий раздел основан на работе [76].

### **2.2.1 Обобщённый критерий адекватности моделей систем распознавания методом дуальных энергий**

Выше подчёркнуто, что под распознаванием материалов ОК понимается отнесение его к одной из больших групп материалов по тому или иному параметру.

Пусть  $\mathbf{A}$  представляет собой конечное множество, любой элемент которого  $a$ ,  $a \in \mathbf{A}$ , сопоставляется с одной и только одной группой из упомянутых в соответствующем определении групп материалов. Параметр  $a$

является ПР. Наиболее удобно для сопоставления использовать эффективный атомный номер  $Z$ , который является средним атомным номером для смеси материалов в данном объекте. Следует отметить, что значение эффективного атомного номера различно для используемых диапазонов максимальных энергий рентгеновского излучения в МДЭ. Материал ОК или его фрагмента должен быть правильно идентифицирован вне зависимости от его размера в направлении просвечивания  $H$  и плотности  $\rho$ . В качестве интегральной характеристики логично использовать произведение  $\rho H$  – массовую толщину. С прикладной точки зрения представляет интерес диапазон изменения  $\rho H$  –  $[\rho H_{\min}, \rho H_{\max}]$ , в котором материал ОК, принадлежащей группе  $\mathbf{A}$ ,  $a \in \mathbf{A}$ , достоверно идентифицируется с заданной потребителем доверительной вероятностью. Для оценки качества способов распознавания материалов на основе МДЭ и получения калибровочных данных используются тестовые объекты. ТО могут состоять только из конечного количества фрагментов, поэтому логично определить множество

$$\mathbf{R}(a) = \{\rho H_i(a), i = 1..n(a), a \in \mathbf{A}\}, \quad (2.32)$$

где  $n(a)$  – количество фрагментов с варьируемым параметром  $\rho H$  для элемента  $a$  (группы материалов). Дополнительно введём множество  $\mathbf{M}_I$ , которое назовём областью потребительского интереса, следующим образом

$$\mathbf{M}_I = \{(\rho H, a) : \rho H \in \mathbf{R}(a); a \in \mathbf{A}\}. \quad (2.33)$$

В процессе обработки исходных радиографических изображений в МДЭ для каждого фрагмента ОК вычисляется один или два промежуточных параметра. В первом случае промежуточный параметр и является ПР. Во втором же случае промежуточные параметры представляют собой параметры МДЭ, из которых определяется соответствующий конечный ПР. Любые из указанных групп параметров могут быть использованы для построения того или иного критерия адекватности. Пусть совокупность некоторых векторов  $p = (p_1, p_2, \dots, p_k)$  используется для построения критерия адекватности систем распознавания материалов. Назовём эти вектора векторами параметров

критерия. Для построения критерия используются наборы двух векторов – теоретического  $p$  и экспериментального –  $\tilde{p}$ . Приведём искомый критерий в максимально обобщённом виде

$$\mathbf{M}_I \subset \mathbf{M}^* = \{(\rho H, a) : |p_i(\rho H, a) - \tilde{p}_i(\rho H, a)| \leq \Delta p_i(\rho H, a); i = 1, k\}, \quad (2.34)$$

здесь  $\Delta p_i(\rho H, a)$ ,  $i=1, k$  – предельные отклонения теоретических и экспериментальных параметров.

Приведём словесную формулировку критерия (2.34). Адекватность анализируемой математической модели распознавания материалов считается подтвержденной, если множество  $\mathbf{M}_I$ , определяющее область потребительского интереса, является подмножеством  $\mathbf{M}^* = \{(\rho H, a)\}$  пар значений  $\rho H$  и  $a$ , для которых близки по координатно теоретические и экспериментальные вектора проверяемых параметров. Конкретизация критерия адекватности математических моделей системы распознавания, основанного на выражении (2.34), существенным образом зависит от подхода к распознаванию и от параметров критерия. Ниже рассмотрим адекватность обоих подходов к распознаванию материалов – по эффективному атомному номеру и по уровневым функциям.

### 2.2.2 Распознавание по эффективному атомному номеру

Способ распознавания вещества ОК по эффективному номеру методом дуальных энергий сводится к формированию двух первичных радиографических изображений и их последующей обработке. Первичные радиографические изображения формируются в результате сканирования ОК пучками рентгеновского излучения с максимальными энергиями  $E_1$  и  $E_2$ . Первичные радиографические изображения трансформируются на первом этапе обработки в изображения метода дуальных энергий, а на втором этапе – в конечное идентификационное изображение, которое для анализируемого случая будет представлять собой распределение эффективного атомного номера  $Z$  по поверхности первичного радиографического изображения.

Алгоритм распознавания вещества объекта контроля методом дуальных энергий подробно изложен в предыдущем разделе. Для оценки адекватности соответствующей математической модели необходимо сравнить модельные (теоретические) конечные идентификационные изображения объекта контроля с изображениями, полученными экспериментальным путем. В качестве ОК логично использовать тестовый объект, предельные значения параметров которого удовлетворяют запросам потребителя досмотрового комплекса. В работе [59] приведено обобщенное описание ТО, состоящего из фрагментов с одинаковыми квадратными сечениями. Сопоставим с элементом множества  $a \in \mathbf{A}$ , описанного в первом разделе, значение эффективного атомного номера  $Z$ . В этой ситуации фрагменты ТО характеризуется парой чисел  $(\rho H, Z)$ , где  $\rho H$  – массовая толщина фрагмента в  $\text{г/см}^2$ ,  $Z$  – эффективный атомный номер.

В результате первичной обработки исходных радиографических изображений тестового объекта  $\mathbf{I}_1$  и  $\mathbf{I}_2$ , соответствующих максимальным энергиям рентгеновского излучения  $E_1$  и  $E_2$ , могут быть оценены средние значения радиационных толщин всех фрагментов ТО для энергий  $E_1$  и  $E_2$ . Фрагмент с характеристиками  $(\rho H, Z)$  ставится в соответствие с его радиационными толщинами  $Y_1(\rho H, Z)$  и  $Y_2(\rho H, Z)$ , измеряемыми в длинах свободного пробега (д.с.п.).

На следующем этапе для всех фрагментов  $(\rho H, Z)$ ,  $\rho H \in \mathbf{R}(a)$ ,  $a \in \mathbf{A}$  находятся параметры МДЭ –  $A(\rho H, Z)$  и  $B(\rho H, Z)$ , которые связаны с характеристиками ОК соотношениями  $A(\rho H, Z) \approx \rho H$  и  $B(\rho H, Z) \approx \rho H F(Z)$ . Для источников рентгеновского излучения с максимальной энергией до 150 кэВ функция  $F(Z) \approx Z^{3,8}$  [43, 77], а для источников высокоэнергетического рентгеновского излучения с максимальной энергией свыше 1,022 МэВ функция  $F(Z) \approx Z$  [43, 77].

Заключительный этап алгоритма сводится к оценке эффективных атомных номеров веществ всех фрагментов ОК, то есть набора  $\tilde{Z}(\rho H, Z)$ ,

$\rho H \in \mathbf{R}(Z), Z \in \mathbf{A}$ . Формула для получения указанных оценок имеет следующий вид

$$\tilde{Z}(\rho H, Z) = F^{-1} \left( \frac{B(\rho H, Z)}{A(\rho H, Z)} \right), \quad (2.35)$$

где  $F^{-1}$  – функция обратная к  $F$ . Конкретизация критерия адекватности (2.35) применительно к распознаванию по эффективному атомному номеру в формализованном виде имеет вид

$$M_I \subset M^* = \{(\rho H, Z) : |\tilde{Z}(\rho H, Z) - Z_I(\rho H, Z)| \leq \Delta Z(\rho H, Z)\}. \quad (2.36)$$

Здесь в первом приближении зададим  $Z_I(H, Z) = Z$ .

Представленный выше метод назовём критерием адекватности распознаванию материалов ОК по эффективному атомному номеру (конечному параметру МДЭ). В соответствии с разделом 2.2.1 в качестве критерия адекватности может быть использован подход, основанный на анализе пар экспериментальных исходных или промежуточных изображений МДЭ с парами теоретических изображений. Такой подход для рассматриваемого случая является обоснованным, так как равенство теоретических и экспериментальных изображений обуславливает равенство конечных изображений МДЭ. Указанный вывод не требует доказательств, потому что и в случае экспериментальных исследований, и в случае теоретических исследований алгоритм трансформации исходных изображений в конечные изображения один и тот же.

Назовём соответствующий критерий критерием адекватности по промежуточным параметрам МДЭ  $Y_1(\rho H, Z)$  и  $Y_2(\rho H, Z)$ . Далее формализуем введённый критерий применительно к ТО. Формализация критерия осуществляется по аналогии с подходом, основанным на выражении (2.36). Критерий адекватности по промежуточным параметрам МДЭ имеет вид

$$\mathbf{M}_I \subset \mathbf{M}^* = \{(\rho H, Z) : |p_i(\rho H, Z) - \tilde{p}_i(\rho H, Z)| \leq \Delta p_i(\rho H, Z); i = 1, 2\}. \quad (2.37)$$

В качестве пар теоретических и экспериментальных параметров  $p_1, p_2$  и  $\tilde{p}_1, \tilde{p}_2$  в выражении (2.37) могут быть использованы соответствующие

значения радиационных толщин  $Y(E_1, \rho H, Z)$  и  $Y(E_2, \rho H, Z)$  или конечные параметры метода дуальных энергий –  $A(\rho H, Z)$  и  $B(\rho H, Z)$ .

Несмотря на абсолютную физическую прозрачность второго критерия адекватности, применение его на практике вызывает определённые затруднения. Они связаны с необходимостью предварительных расчётов предельных отклонений промежуточных параметров, основываясь на предельных отклонениях по эффективному атомному номеру. Предельные отклонения по эффективному атомному номеру являются более понятными потребителям разрабатываемых систем распознавания материалов ОК и их фрагментов. Основываясь на этом замечании, будем придерживаться критерия (2.36) только для распознавания по эффективному атомному номеру.

### 2.2.3 Распознавание по методу линий уровней

Метод распознавания материалов ОК и их фрагментов методом линий уровней подробно описан в работах [51, 59] и в разделе 2.1. Метод основан на вычислении для каждой точки исходных радиографических изображений некоторого ПР  $q$ . Значение ПР  $q$  в точке с координатами  $(x, y)$  вычисляется с помощью выражения.

$$q(x, y) = \frac{Y_2(x, y)}{Y_1(x, y)} = Q(Y_1(x, y)). \quad (2.38)$$

Подчеркнём, что отношение  $q$  рассматривается как некоторая функция от радиационной толщины для источника рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_1$ .

Существуют особенности применения выражения (2.38) для различных диапазонов максимальных энергий рентгеновского излучения. Эти особенности связаны с отождествлением максимальных энергий  $E_1$  и  $E_2$  с «низкой» и «высокой» энергиями, см. раздел 2.1. Укажем упомянутые отождествления. Для диапазона максимальных энергий рентгеновского



излучения, меньших 1 МэВ, выберем  $E_2 < E_1$ , а для диапазона максимальных энергий, больших 1 МэВ, –  $E_2 > E_1$ .

Совокупность функций  $Q(Y_1(x, y))$  формируется по специальным ТО, описанным выше, для всех классов  $a$ ,  $a \in \mathbf{A}$  идентифицируемых материалов. Эта совокупность является вспомогательной и служит для построения полного набора линий уровней  $U_-(Y_1(x, y))$  и  $U_+(Y_1(x, y))$ .

Материал ОК по лучу, соединяющему излучающую точку и точку  $(x, y)$ , будет отнесен к классу  $a$ ,  $a \in \mathbf{A}$ , если выполняется соотношение, аналогичное выражению (2.27),

$$U_-(Y_1(x, y), a) \leq q(x, y) < U_+(Y_1(x, y), a). \quad (2.39)$$

Для конкретизации исходного обобщённого критерия адекватности (2.34) применительно к распознаванию материалов ОК методом линий уровней воспользуемся тем, что набор линий уровней однозначно определяется набором функций  $Q(Y_1(x, y), a)$ ,  $a \in A$ . Здесь с классом распознаваемых материалов  $a$  сопоставляется наиболее характерный для этого класса материал. К таким характерным материалам отнесем полиэтилен, алюминий, железо.

Первый вариант конкретизирующего критерия можно назвать критерием идентифицирующих функций. Воспользовавшись подходом из предыдущего пункта, получим следующее формальное описание критерия адекватности

$$\mathbf{M}_l \subset \mathbf{M}^* = \{(\rho H, a) : |Q(Y_1(\rho H, a)) - \tilde{Q}(Y_1(\rho H, a))| \leq \Delta Q(Y_1(\rho H, a))\}. \quad (2.40)$$

Критерий адекватности математических моделей, основанный на выражении (2.40), имеет существенно меньшую зависимость от изменения взаимного геометрического положения ТО и ИДК, чем критерий адекватности по конечным параметрам МДЭ, проанализированный выше.

Второй вариант связан с конкретизацией критерия (2.34) и аналогичен критерию адекватности по промежуточным параметрам МДЭ, описанному в предыдущем пункте. Следует отметить, что конечное замечание,

приведённое в разделе 2.2.2 справедливо и для текущего раздела. Поэтому при сопоставлении теоретических и экспериментальных результатов распознавания материалов методом линий уровней целесообразно придерживаться критерия адекватности, основанного на формуле (2.40).

### 2.2.4 Вычислительные формулы

В этом пункте будет приведена совокупность формул, лежащих в основе математических моделей распознавания материалов ОК. Частичный повтор выражений из раздела 2.1 позволяет корректно отследить всю последовательность трансформации исходной информации и проверить работоспособность критериев адекватности, описанных выше.

#### 2.2.4.1 Распознавание по эффективному атомному номеру

Теоретические значения радиационных толщин фрагмента  $(\rho H, Z)$  для источников рентгеновского излучения с максимальными энергиями  $E_1, E_2$  находятся с помощью выражений [1]

$$Y_1(\rho H, Z) = -\ln \left\{ \frac{\text{int} \left( N_{01} \int_0^{E_1} E_{\text{ab}}(E) f(E, E_1) \varepsilon(E, h) e^{-m(E, Z) \rho H} dE / \Delta I \right)}{\text{int} \left( N_{01} \int_0^{E_1} E_{\text{ab}}(E) f(E, E_1) \varepsilon(E, h) dE / \Delta I \right)} \right\},$$

$$Y_2(\rho H, Z) = -\ln \left\{ \frac{\text{int} \left( N_{02} \int_0^{E_2} E_{\text{ab}}(E) f(E, E_2) \varepsilon(E, h) e^{-m(E, Z) \rho H} dE / \Delta I \right)}{\text{int} \left( N_{02} \int_0^{E_2} E_{\text{ab}}(E) f(E, E_2) \varepsilon(E, h) dE / \Delta I \right)} \right\}. \quad (2.41)$$

Здесь  $N_{01}, N_{02}$  – количество квантов рентгеновского излучения с максимальными энергиями  $E_1$  и  $E_2$ , регистрируемых детектором, при отсутствии ОК;  $E_{\text{ab}}(E)$  – среднее значение поглощенной энергии зарегистрированного фотона с энергией  $E$ ;  $f(E, E_i)$  – энергетический спектр рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ ;  $\varepsilon(E, h)$  – эффективность регистрации фотона с энергией  $E$  сцинтиллятором толщиной  $h$ ;  $m(E, Z)$  – массовый коэффициент ослабления фотонного

излучения с энергией  $E$ ;  $\text{int}(x)$  – целая часть числа  $x$ ;  $\Delta I$  – интервал квантования.

В работах [51, 76] приводятся системы интегральных параметрических уравнений для нахождения параметров метода дуальных энергий  $\underline{\mathbf{A}}$  и  $\mathbf{B}$ . Исходя из цели, поставленной в работе, будем использовать систему уравнений для нахождения  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ , близкую к (2.41),

$$\begin{aligned}
 -\ln \left\{ \frac{\int_0^{E_1} E_{ab}(E) f(E, E_1) \varepsilon(E, h) e^{-g_1(E)A - g_2(E)B} dE}{\int_0^{E_1} E_{ab}(E) f(E, E_1) \varepsilon(E, h) dE} \right\} &= Y_1(\rho H, Z), \\
 -\ln \left\{ \frac{\int_0^{E_2} E_{ab}(E) f(E, E_2) \varepsilon(E, h) e^{-g_1(E)A - g_2(E)B} dE}{\int_0^{E_2} E_{ab}(E) f(E, E_2) \varepsilon(E, h) dE} \right\} &= Y_2(\rho H, Z).
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

Здесь  $g_1(E)$ ,  $g_2(E)$  – энергетические зависимости эффектов взаимодействия фотонного излучения с веществом фрагмента. Индексу «1» соответствует эффект Комптона. Индексу «2» соответствует фотоэффект для диапазона максимальных энергий рентгеновского излучения меньших 1,022 МэВ и эффект рождения пар для диапазона максимальных энергий рентгеновского излучения больших 1,022 МэВ. Отметим, что система (2.42) выведена при условии  $\Delta I \approx 0$ , то есть для АЦП с бесконечным количеством разрядов. В работах [51, 61, 62] достаточно подробно рассмотрены вопросы, связанные с влиянием разрядности АЦП на точность определения эффективного атомного номера. В результате решения систем (2.42) для каждого фрагмента ТО ( $\rho H, Z$ ) определяются параметры МДЭ –  $A(\rho H, Z)$  и  $B(\rho H, Z)$ .

Выше подчеркнуто, что на последнем этапе алгоритма для фрагмента ( $\rho H, Z$ ) находится оценка эффективного атомного номера

$$Z_t = F^{-1} \left( \frac{B}{A} \right). \tag{2.43}$$

Функция  $F^{-1}$  имеет различный вид для диапазонов низкоэнергетической и высокоэнергетической реализаций МДЭ. Для низкоэнергетической реализации –  $F^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) = \sqrt[3.8]{\frac{B}{A}}$ , а для высокоэнергетической –  $F^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) = \frac{B}{A}$ .

Очевидно, что существует различие между оценкой эффективного атомного номера  $Z_t$  и его идеальным значением  $Z$ . Указанное различие вызывается несколькими причинами, например, погрешностью интегрирования, дискретизацией, вычислительной погрешностью при решении системы нелинейных уравнений (2.42) и другими. Часть этих причин была подробно обсуждена в работе [26].

Каждый элемент исходных радиографических изображений тестового объекта  $I_1$  и  $I_2$  представляет собой целое число, которое может принимать значения от 0 до  $2^m - 1$ , где  $m$  – разрядность АЦП. Исходные изображения подвергаются калибровке по «чёрному» и по «белому», а затем логарифмируются. Для фрагментов тестового объекта контроля с характеристиками  $(\rho H, Z)$  определяются экспериментальные оценки лучевых толщин. Значения  $\tilde{Y}_1(\rho H, Z)$  и  $\tilde{Y}_2(\rho H, Z)$  используются в качестве правой части системы (2.42) с целью получения вначале экспериментальных оценок параметров МДЭ –  $\tilde{A}(\rho H, Z)$  и  $\tilde{B}(\rho H, Z)$ , а затем экспериментальной оценки эффективного атомного номера –  $\tilde{Z}$ , которая осуществляется с помощью формулы (2.43).

#### 2.2.4.2 Распознавание по методу линий уровней

Теоретическое значение параметра  $Q$  для фрагмента ТО с исходными характеристиками  $(\rho H, Z)$  и соответствующими радиационными толщинами  $Y_1(\rho H, Z)$  и  $Y_2(\rho H, Z)$  находятся по формуле

$$Q(Y_1(\rho H, Z)) = \frac{Y_2(\rho H, Z)}{Y_1(\rho H, Z)}. \quad (2.44)$$

Для оценки радиационных толщин  $Y_1(\rho H, Z)$  и  $Y_2(\rho H, Z)$  используются выражения (2.44). Соответствующие экспериментальные значения параметра

распознавания  $\tilde{Q}$  для фрагмента с параметрами  $(\rho H, Z)$  находятся подстановкой в (2.44) экспериментальных значений радиационных толщин –  $\tilde{Y}_1(\rho H, Z)$  и  $\tilde{Y}_2(\rho H, Z)$ . Отметим, что теоретические и экспериментальные зависимости  $Q(\rho H, Z)$  для уменьшения влияния пространственных отклонений положения фрагментов ОК перед сравнением друг с другом целесообразно трансформировать в зависимости  $Q(Y_1)$ .

### 2.2.5 Экспериментальная проверка адекватности математических моделей распознавания материалов методом дуальных энергий

Проверка степени близости теоретических и экспериментальных параметров распознавания проводилась на инспекционном досмотровом комплексе Томского политехнического университета. Область потребительского интереса ограничивалась множеством

$$\mathbf{M}_l = \{(\rho H, a) : \rho H \in \mathbf{R}(a) = \{20, 40, 60, 80, 100\}; a \in \mathbf{A} = \{6, 13, 26\}\}. \quad (2.45)$$

Любой элемент  $a$  из множества  $\mathbf{A}$  ассоциирован с эффективным атомным номером вещества  $Z$ . В область потребительского интереса включены объекты контроля из материалов с небольшими значениями эффективных атомных номеров, что обусловлено необходимостью в линейном описании зависимости  $g_2(E)$  от эффективного атомного номера. Отметим, что в (2.45) реальные значения  $Z$  и  $\rho H$  могут незначительно отличаться от ассоциируемых значений из-за наличия примесей в тестовых объектах. В высокоэнергетической реализации МДЭ первичные радиографические изображения формировались для пары максимальных энергий рентгеновского излучения  $E_1=4,5$  МэВ,  $E_2=9$  МэВ. Для описания энергетического спектра рентгеновского излучения бетатронов использовали формулу Шиффа [69].

Зависимости МКО фотонного излучения от энергии  $m(E)$ , необходимые для вычисления теоретических значений промежуточных параметров  $Y_1(\rho H, Z)$  и  $Y_2(\rho H, Z)$ , заимствованы из библиотек [67, 68]. Энергетические зависимости  $g_1(E)$ ,  $g_2(E)$  эффектов Комптона и рождения пар также были

взяты из библиотек [67, 68]. Для регистрации рентгеновского излучения в инспекционном досмотровом комплексе Томского политехнического университета применены детекторы на основе сцинтиллятора  $\text{CdWO}_4$  длиной 30 мм. АЦП имеет разрядность 16. Экспериментально проверялись два критерия адекватности моделей систем распознавания методом дуальных энергий – критерий адекватности распознавания по эффективному атомному номеру и критерий адекватности распознавания по методу линий уровней. На рисунке 2.3 приведены теоретические (истинные), расчётные и экспериментальные зависимости  $Z_{eff}(\rho H)$ . Из анализа данных, приведённых на рисунке 2.3, можно сделать вывод об адекватности модели распознавания по эффективному атомному номеру для рассматриваемой области потребительского интереса (2.45) и допустимых предельных отклонений  $\Delta Z_{eff} \approx 5$  эффективного атомного номера [88].

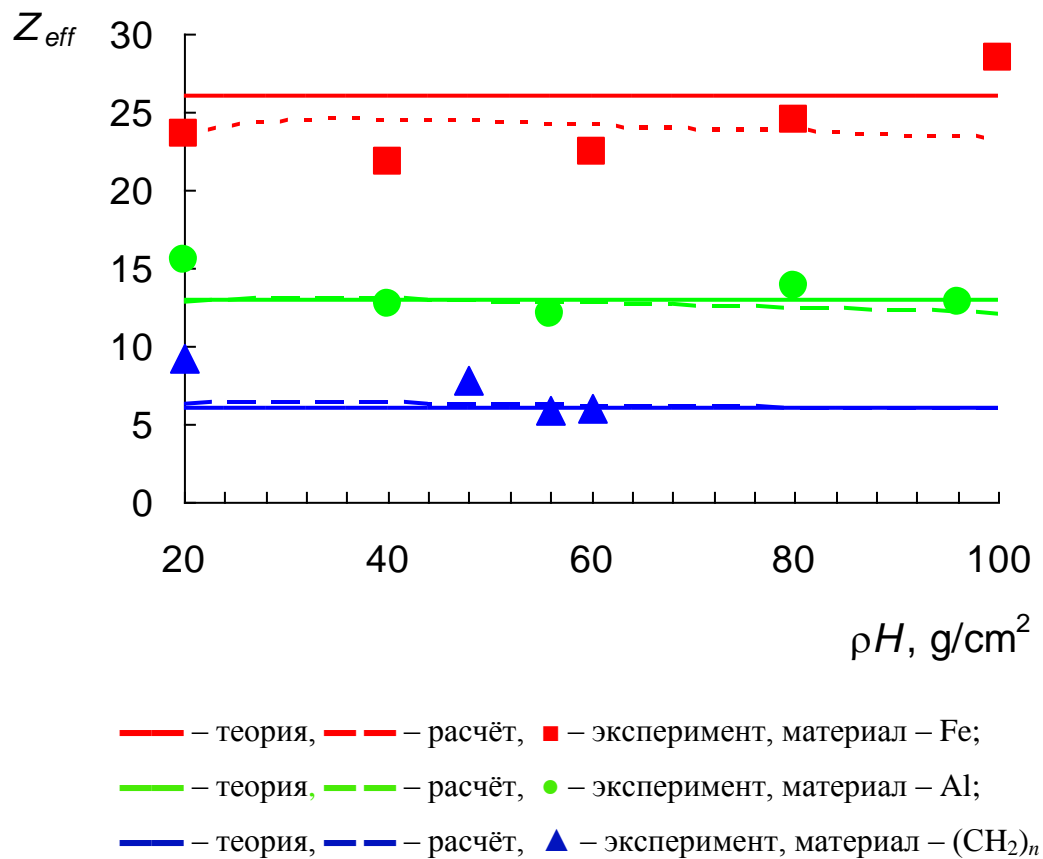


Рисунок 2.3 – Теоретические и экспериментальные зависимости  $Z_{eff}(\rho H)$

На рисунке 2.4 приведены расчётные и экспериментальные зависимости ПР  $Q(Y_1)$ .

Отметим, что различие теоретических и расчётных зависимостей на рисунке 2.3 связано, прежде всего, с неточностью замены ЛКО фотонного излучения суммой ЛКО для двух основных эффектов взаимодействия. Именно поэтому при проверке предлагаемых критериев адекватности в область потребительского интереса не были включены фрагменты из свинца.

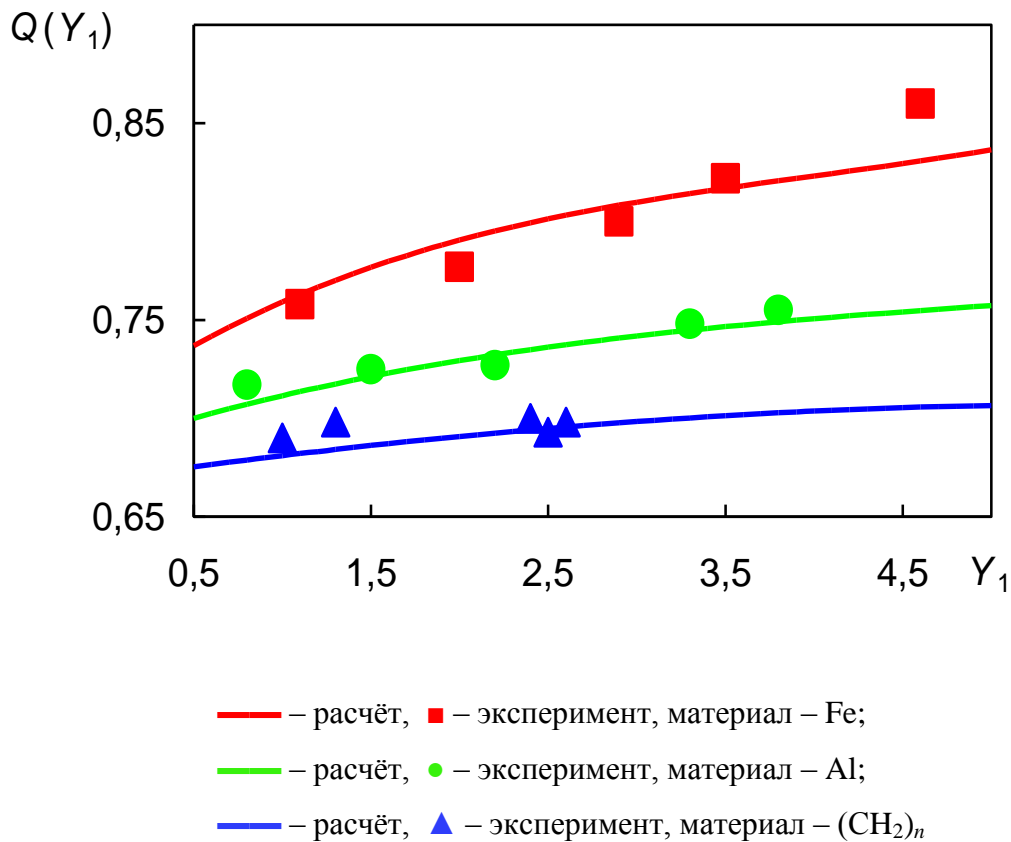


Рисунок 2.4 – Расчётные и экспериментальные зависимости  $Q(Y_1)$

Из анализа данных, приведённых на рисунке 2.4, можно сделать вывод об адекватности модели распознавания методом линий уровней для рассматриваемой области потребительского интереса и допустимых предельных отклонений  $\Delta Q \approx 0,012$  параметра распознавания, что соответствует половине расстояния между линиями уровня для малых  $Y_1$  (малых толщин рассматриваемых объектов).

### 2.3 Выводы по главе 2

Во 2-ой главе разработана математическая модель, представляющая собой совокупность математических соотношений, позволяющих оценить погрешность определения параметров распознавания для двух реализаций метода дуальных энергий – распознаванию по эффективному атомному номеру и по методу линий уровней. Для иллюстрации был проведён пример расчёта погрешности определения параметров распознавания применительно к инспекционному досмотровому комплексу Томского политехнического университета на базе малогабаритного бетатрона МИБ-9. В результате сравнения теоретических и экспериментальных оценок погрешности ПР доказана работоспособность предлагаемых алгоритмов оценки качества сканирующих СЦР с функцией распознавания веществ объектов контроля и их фрагментов.

Сформулированы рекомендации по выбору структуры пакета импульсов рентгеновского излучения для формирования единичной строки идентификационного изображения метода дуальных энергий.

Приведенные в главе критерии адекватности моделей досмотровых комплексов с функцией распознавания материалов и их фрагментов методом дуальных энергий могут быть использованы при проектировании, а также для количественного сравнения качества различных комплексов.

Проанализированы два основных подхода к построению критериев адекватности – по конечным и промежуточным параметрам метода дуальных энергий. Критерии конкретизированы применительно к распознаванию по эффективному атомному номеру и по линиям уровня. Результаты сравнения экспериментальных и теоретических оценок параметров распознавания фрагментов тестового объекта, просканированного веерными пучками рентгеновского излучения с максимальными энергиями 4,5 и 9 МэВ, подтверждают работоспособность предложенных критериев адекватности при допустимых погрешностях.



### ГЛАВА 3. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

Выделяют две основные реализации МДЭ – двухэнергетическую цифровую радиографию (ЦР) и двухэнергетическую рентгеновскую вычислительную томографию (РВТ). Изначально МДЭ был разработан для компенсации (существенного уменьшения) негативного влияния немонотонности (полихроматичности) излучения на точность восстановления изображений именно в РВТ [78–83]. В дальнейшем МДЭ стали применяться в промышленности, например, для исследования трехфазных потоков [77]. В последнее время основными задачами, решаемыми с помощью различных реализаций МДЭ, являются задачи распознавания материалов ОК и их фрагментов в инспекционном досмотровом контроле [57, 61–63, 84–88]. Под распознаванием материалов в широком смысле понимается оценка его эффективного атомного номера или другого ПР, прямо или косвенно связанного с ним.

Метод дуальных энергий основан на нескольких важнейших физических закономерностях:

1. Линейный коэффициент ослабления излучения гамма-излучения равен сумме линейных коэффициентов ослабления, обусловленных различными эффектами взаимодействия фотонов с ослабляющим веществом (фото-эффект, когерентное рассеяние, некогерентноерассеяние, эффект образования пар).

2. Линейные коэффициенты ослабления гамма-излучения за счёт различных эффектов взаимодействия по разному зависят от эффективного атомного номера и плотности ослабляющего вещества и от энергии фотонного излучения.

3. Для различных участков энергетического спектра источника рентгеновского излучения вклад того или иного процесса в интегральный линейный коэффициент ослабления является различным.

В методе дуальных энергий на основе измерений ослабления рентгеновского излучения двух максимальных энергий, подобранных специальным образом, отдельно оцениваются два некоторых параметра, далее – параметра МДЭ. Один из параметров МДЭ зависит от толщины и плотности вещества ОК, а второй и от эффективного атомного номера.

Существует несколько способов определения параметров МДЭ. В работе [81] конечные параметры МДЭ связывают с первичными радиометрическими сигналами с помощью двумерной регрессии второго порядка. Этот подход является высокопроизводительным, но его точность не удовлетворяет современного потребителя. Метод [82] основан на предварительном построении таблиц, связывающих исходные и конечные параметры МДЭ, для базисных материалов, характерных для медицины, и использовании таблиц для оценки параметров МДЭ по реальным данным с помощью интерполяции. Для более точного определения параметров МДЭ, по сравнению с методом [82], в статье [83] предлагается использовать итерационные методы решения соответствующих систем уравнений. Для способа из [83] вычислительная погрешность  $10^{-6}$  достигается за 10 итераций.

Наиболее физически обоснован способ, связанный с решением нелинейных систем двухпараметрических интегральных уравнений [43]. Для решения таких систем нелинейных уравнений в [43] рекомендуется применять метод Ньютона или метод секущих. Основным недостатком этих методов, обусловленным видом нелинейных интегральных параметрических уравнений, является их невысокая производительность, связанная с необходимостью вычисления интегралов с достаточно сложной подынтегральной функцией на каждом шаге итерации. Указанный недостаток характерен и для способа, описанного в [82]. В практических приложениях МДЭ в современных комплексах ЦР и ИДК [83–88] обрабатываются двумерные изображения, состоящие из  $10^6$  и более точек (пикселей), а в комплексах промышленной рентгеновской томографии трехмерные изображения, состоящие из  $10^9$  и более пикселей.

Существующие методы решения систем нелинейных интегральных параметрических уравнений не в полной мере удовлетворяют потребителя, так как с их точки зрения процесс формирования исходных радиографических изображений недопустимо разнесен по времени с визуализацией конечных двумерных или трехмерных изображений. Из вышеизложенного следует, что вопрос разработки высокопроизводительных и высокоточных способов определения параметров МДЭ продолжает оставаться актуальным. Особую значимость указанная проблема имеет для контроля неоднородных по структуре объектов, характерной особенностью которых является то, что массовые толщины фрагментов и эффективные атомные номера материалов фрагментов могут принимать значения из широких диапазонов.

Материал последующего раздела написан на основе статьи [89].

Для глубокого понимания сути разрабатываемых алгоритмов рассмотрим основы МДЭ несколько более многосторонне и подробно, чем в предыдущих разделах.

### 3.1 Основы метода дуальных энергий

В методе дуальных энергий на первом этапе формируются радиометрические сигналы для максимальных энергий рентгеновского излучения  $E_1$  и  $E_2$ . Пусть на фронтальную поверхность радиометрического детектора толщиной  $h_d$  за время измерения падает  $N_i$  фотонов рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ . Связь радиометрического сигнала  $I_i$ ,  $i=1,2$  и характеристик ОК для максимальной энергии рентгеновского излучения  $E_i$  описывается выражением

$$I_i(h) = N_i \int_0^{E_i} E_{ab}(E) f(E, E_i) e^{-\mu(E)h} \varepsilon(h_d, E) dE, \quad (3.1)$$

где  $f(E, E_i)$  – числовой энергетический спектр рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ ;  $\mu(E)$  – энергетическая зависимость линейного коэффициента ослабления (ЛКО) фотонного излучения веществом ОК;

$E_{ab}(E)$  – среднее значение поглощенной энергии для кванта с энергией  $E$ , зарегистрированного детектором;  $\varepsilon(h_{sc}, E)$  – эффективность регистрации излучения с энергией  $E$  для детектора толщиной  $h_d$ .

Во введении к разделу отмечены основные физические закономерности, положенные в основу МДЭ. В формализованном виде они сводятся к следующему представлению энергетической зависимости ЛКО веществом ОК

$$\mu(E) = a_1 g_1(E) + a_2 g_2(E), \quad (3.2)$$

здесь  $g_1(E)$ ,  $g_2(E)$  – энергетические зависимости коэффициентов ослабления фотонного излучения для двух физических эффектов взаимодействия фотонного излучения с веществом;  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты, зависящие от плотности  $\rho$  и эффективного атомного номера материала ОК  $Z$ .

Для определенности соотнесем энергетическую зависимость  $g_1(E)$  с фотоэффектом для диапазона низких энергий рентгеновского излучения и с эффектом рождения пар для диапазона высоких энергий. Функция  $g_2(E)$  в обоих случаях будет соответствовать эффекту Комптона.

С помощью выражений (3.1), (3.2) выводится система нелинейных интегральных параметрических уравнений связи радиационных толщин ОК в средних длинах свободного пробега (д.с.п.) рентгеновского излучения  $Y(E_1)$  и  $Y(E_2)$  с максимальными энергиями  $E_1$  и  $E_2$  с искомыми параметрами МДЭ –  $A = a_1 h$  и  $B = a_2 h$ . Указанная система описывается выражением (2.42). Для удобства назовем  $Y(E_1)$  первым информативным параметром, а  $Y(E_2)$  – вторым информативным параметром.

С учетом сказанного выше, значение параметра  $A$  равно произведению некоторой функции от эффективного атомного номера вещества ОК  $Z$  на плотность вещества объекта  $\rho$  и на его текущую толщину  $h$ . Произведение  $\rho h$  называется массовой толщиной. Зависимость  $A(Z, \rho h)$  имеет различный вид для фотоэффекта и эффекта рождения пар

$$A(Z, \rho h) = \begin{cases} Z^{3.8} \rho h, & \text{фотоэффект, [1],} \\ Z \rho h, & \text{эффект рождения пар, [40].} \end{cases} \quad (3.4)$$

Принято считать, что зависимость  $B(Z, \rho h)$  описывается выражением

$$B(Z, \rho h) = \rho h. \quad (3.5)$$

В литературе, например, [81, 90] имеются выражения для описания энергетических зависимостей  $g_1(E)$  для фотоэффекта

$$g_1(E) = C_1 E^{-3}, \quad E \geq 0,02 \text{ МэВ}, \quad (3.6.1)$$

и эффекта рождения пар [91, 92]

$$g_1(E) = C_2 \begin{cases} 0, & E < 3,424 \text{ МэВ} \\ \frac{14}{3} \ln(3,914E) - \frac{109}{9}, & E \geq 3,424 \text{ МэВ}. \end{cases} \quad (3.6.2)$$

Коэффициенты  $C_1$ ,  $C_2$  в формулах (3.6.1) и (3.6.2) являются константами. Отметим, что вероятность взаимодействия фотонов с веществом по сценарию эффекта рождения пар имеет значение, отличное от нуля, начиная с энергии 1,022 МэВ. Пороговое же значение энергии  $E=3,424$  МэВ в (3.6.2) обеспечивает условие положительности функции  $g_1(E)$ .

Зависимость сечения Комптона от энергии описывается классическим выражением [81, 90]

$$g_2(\alpha) = C_3 \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{\ln(1+2\alpha)}{\alpha} \right] + \frac{\ln(1+2\alpha)}{2\alpha} - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\}, \quad (3.7)$$

где  $\alpha=E/0,511$ ,  $E$  – энергия в МэВ;  $C_3$  – постоянный коэффициент.

Зависимость эффективности регистрации фотонного излучения от энергии  $E$  и толщины чувствительного объема детектора в направлении распространения излучения  $h_d$  имеет вид

$$\varepsilon(h, E) = 1 - e^{-\mu_d(E)h_d}, \quad (3.8)$$

где  $\mu_d(E)$  – зависимость ЛКО фотонного излучения материалом детектора от энергии, которая может быть вычислена с помощью различных библиотек данных, посвященных ослаблению гамма-излучения, например, [67].

Энергетическая зависимость среднего значения поглощенной энергии зарегистрированного фотона может быть оценена с помощью данных из

упомянутой выше библиотеки [67] или зависимостей  $E_{ab}(E)$  из работы [64], учитывающих размеры и тип детекторов.

Практическая реализация любого способа решения системы интегральных параметрических уравнений (2.42) существенно зависит от диапазона максимальных энергий источников рентгеновского излучения, применяемых в методе дуальных энергий, что обусловлено двумя факторами, первый из которых отражает сложную энергетическую зависимость эффектов взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, а второй связан с описанием энергетических спектров рентгеновского излучения.

Для описания энергетического спектра рентгеновского излучения в области максимальных энергий до 200 кэВ традиционно используют формулу Крамерса, свыше 2 МэВ – формулу Шиффа, а также их различные модификации. В работах [69–72] приведены классические формулы и различные аппроксимации для вычисления энергетических спектров рентгеновского излучения любых диапазонов максимальных энергий, которые вполне адекватно описывают реальные энергетические спектры источников рентгеновского излучения, используемых в различных реализациях МДЭ. Самая простейшая из указанных формул имеет вид

$$f(E, E_{\max}) = \begin{cases} 0, & E < E_{\min}, E > E_{\max} \\ \left( \frac{E_{\max}}{E} - 1 \right) C, & E_{\min} \leq E \leq E_{\max}, \end{cases} \quad (3.9)$$

здесь  $E_{\max}$  – максимальная энергия фотонов в спектре;  $C$  – некоторая константа, от которой не зависят первый и второй информативные сигналы;  $E_{\min}$  – минимальное значение энергии, необходимое для обеспечения сходимости интегралов в (3.1). В процессе вычислений выбор значения  $E_{\min}$  связывают с конкретной используемой базой данных по ослабления гамма-излучения веществом.

Метод дуальных энергий, как метод получения информации о материале ОК, может быть реализован не только для источников

рентгеновского излучения, но и для источников моноэнергетического гамма-излучения, но только в области низких энергий.

Продемонстрируем один из возможных подходов к решению систем параметрических уравнений вида (2.42) для случая, в котором при формировании каждого из информативных сигналов используется гамма-излучение с одной линией в энергетическом спектре.

### 3.2 Основы подхода к экспрессному нахождению параметров метода дуальных энергий

Система (2.42) для моноэнергетических источников гамма-излучения превратится в систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} Ag_1(E_1) + Bg_2(E_1) = \mu(E_1)h = Y(E_1); \\ Ag_1(E_2) + Bg_2(E_2) = \mu(E_2)h = Y(E_2). \end{cases} \quad (3.10)$$

Пусть значения параметров  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  изменяются в диапазонах от  $A_{min}$  до  $A_{max}$  и от  $B_{min}$  до  $B_{max}$  соответственно. Указанные диапазоны задаются потребителем СЦР, ИДК или комплекса РВТ с функцией распознавания материалов ОК и его фрагментов. Отсюда следует, что исходный информативный сигнал  $Y(E_1)$  изменяется от  $Y_{1min} = A_{min}g_1(E_1) + B_{min}g_2(E_1)$  до  $Y_{1max} = A_{max}g_1(E_1) + B_{max}g_2(E_1)$ , а сигнал  $Y(E_2)$  от  $Y_{2min} = A_{min}g_1(E_2) + B_{min}g_2(E_2)$  до  $Y_{2max} = A_{max}g_1(E_2) + B_{max}g_2(E_2)$ .

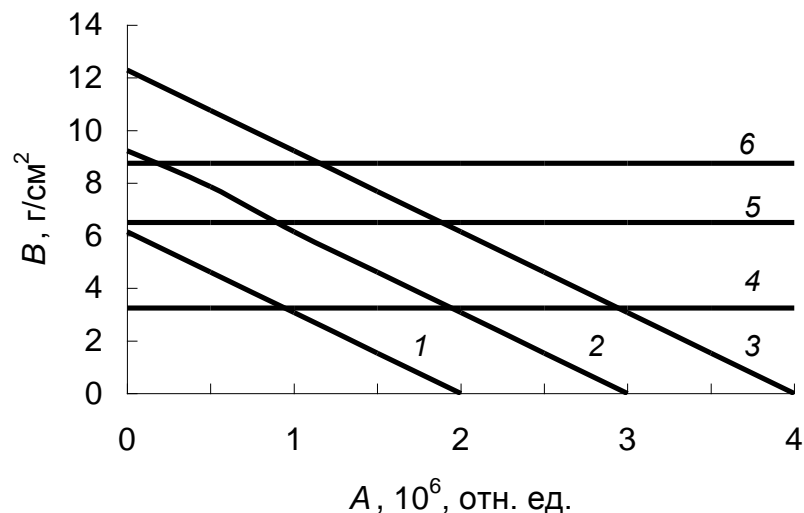
Для любых значений  $Y_1$  (уровней первого информативного сигнала), принадлежащих интервалу  $[Y_{1min}, Y_{1max}]$ , и значений  $Y_2$  (уровней второго информативного сигнала) из интервала  $[Y_{2min}, Y_{2max}]$  можно построить линии  $L(Y_1)$  и  $M(Y_2)$ , задаваемые следующим образом

$$\begin{aligned} L(Y_1) &= \{(A, B) | Y(E_1, A, B) = Y_1\}; \\ M(Y_2) &= \{(A, B) | Y(E_2, A, B) = Y_2\}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Линии  $L(Y_1)$  логично назвать линиями уровней первого информативного сигнала, а линии  $M(Y_2)$  – линиями уровней второго информативного сигнала. Очевидно, что координаты  $(A_0, B_0)$  пересечения линии уровня первого информативного сигнала, соответствующей значению

$Y_{10}$ , и линии уровня второго информативного сигнала, соответствующей значению  $Y_{20}$ , являются решением системы уравнений (3.10).

Анализируемый способ решения представляет собой не что иное, как двумерную реализацию метода обратных функций [93], эффективно применяемого при моделировании случайных величин. Так как в процессе решения используются линии уровней обращения первичных информативных сигналов, то способ решения может быть назван также способом обратных функций. На рисунке 3.1 приведена графическая иллюстрация способа решения системы (3.10), основанного на подходе, изложенном выше.



1 –  $Y_1=1$  д.с.п.; 2 –  $Y_1=2$  д.с.п.; 3 –  $Y_1=3$  д.с.п.; 4 –  $Y_2=0,5$  д.с.п.;  
5 –  $Y_2=1$  д.с.п.; 6 –  $Y_2=1,5$  д.с.п.

Рисунок 3.1 – Линии уровней информативных сигналов для гамма-излучения с энергиями  $E_1=59,5$  кэВ и  $E_2=1250$  кэВ

В качестве источника гамма-излучения с меньшей энергией (низкой) взят радионуклид Am–241 с энергией  $E_1=59,5$  кэВ, а с большей энергией (высокой) – радиоактивный изотоп Co–60 с энергией  $E_2=1250$  кэВ. Значения параметров **A**, **B** изменяли от 0 до максимальных значений, обусловленных значениями уровней первого и второго информативных сигналов  $Y_1$  и  $Y_2$ . Выбрали следующие значения уровней: по  $Y_1=1; 2; 3$  д.с.п. и по  $Y_2=0,5; 1; 1,5$



д.с.п. Линии уровней по второму информативному сигналу горизонтальны, что обусловлено практическим отсутствием вклада фотоэффекта в массовый коэффициент ослабления гамма-излучения с энергией 1250 кэВ. Линии уровней по первому информативному признаку располагаются под углом к вертикали, что свидетельствует о существенном влиянии эффекта Комптона и для энергии 59,5 кэВ.

Заметим, что выбор пары энергий  $E_1=59,5$  кэВ и  $E_2=1250$  кэВ обусловлен желанием продемонстрировать принципиальную возможность горизонтальности линий уровней по второму информативному сигналу.

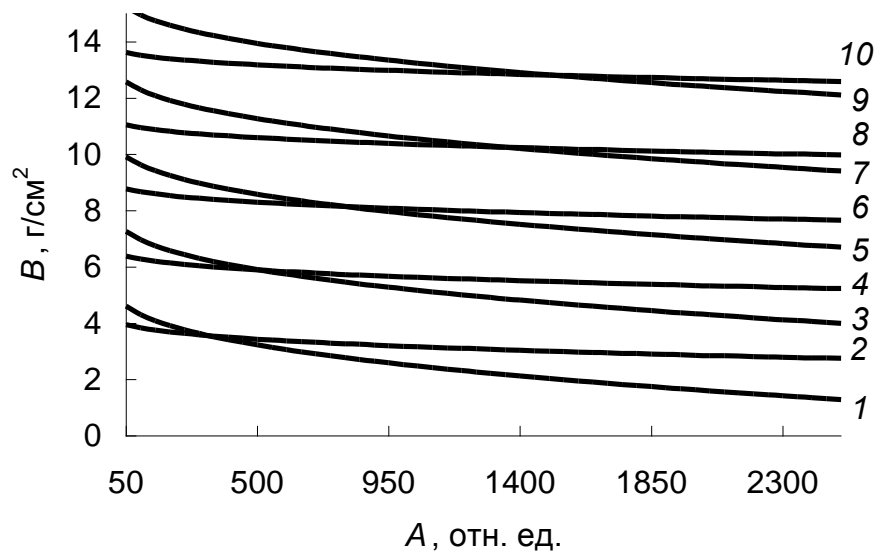
Способ обратных функций, применённый к решению системы (3.10), может быть адаптирован и для решения систем интегральных параметрических уравнений (2.42). Остановимся подробнее на его реализации в общем виде.

### **3.3 Способ обратных функций для определения параметров метода дуальных энергий**

Для адаптации способа обратных функций применительно к решению системы интегральных параметрических уравнений (2.42) воспользуемся графическим визуальным способом определения величин **A** и **B** непосредственно по уравнениям (2.42), левые части которых рассматриваются как функции параметров **A** и **B**. Считается, что заданы функции  $g_1(E)$  и  $g_2(E)$ , описывающие энергетические зависимости массовых коэффициентов ослабления фотонного излучения от энергии для соответствующих пар эффектов взаимодействия, энергетические спектры, зависимости эффективности регистрации единичных радиометрических детекторов от энергии. Из условий, выдвигаемых потребителем комплекса, определяются минимальные и максимальные значения параметров **A** и **B** –  $A_{min}$ ,  $A_{max}$ ,  $B_{min}$ ,  $B_{max}$ . В этом прямоугольном окне определяются значения величин  $A_i$ ,  $B_j$  рассматриваемые как точки на достаточно густой сетке  $i=1 \dots n$ ,  $j=1 \dots m$ . Вычисляя интегралы в левых частях системы уравнений (2.42), для

каждой такой точки получаем элементы двух матриц  $Y(E_1)$  и  $Y(E_2) - Y(E_1, A_i, B_j)$  и  $Y(E_2, A_i, B_j)$ . Пользуясь стандартными программами можно вычерчивать на экране компьютера два семейства изолиний величин  $Y(E_1, A_i, B_j) = Y_1 = \text{const}$  и  $Y(E_2, A_i, B_j) = Y_2 = \text{const}$ .

На рисунке 3.2 для наглядности показан пример реального расчета и совмещения в одном кадре линий уровней первого семейства – максимальная энергия рентгеновского излучения –  $E_1 = 40$  кэВ и второго семейства – максимальная энергия рентгеновского излучения –  $E_2 = 100$  кэВ. Параметры **A** и **B** находятся визуально как точка пересечения отдельных линий первого и второго семейства. Из приведенного расчета видна кривизна линий уровней.



1 –  $Y_1 = 1$  д.с.п.; 2 –  $Y_2 = 0.75$  д.с.п.; 3 –  $Y_1 = 1.5$  д.с.п.; 4 –  $Y_2 = 1.18$  д.с.п.; 5 –  $Y_1 = 2$  д.с.п.  
6 –  $Y_2 = 1.6$  д.с.п.; 7 –  $Y_1 = 2.5$  д.с.п.; 8 –  $Y_2 = 2$  д.с.п.; 9 –  $Y_1 = 3$  д.с.п.; 10 –  $Y_2 = 2.45$  д.с.п.

Рисунок 3.2 – Линии уровней информативных сигналов

В процессе расчетов можно варьировать границы окна изменения параметров **A** и **B**, и тем самым повышать визуальную точность нахождения точки пересечения кривых. Быстродействие этого алгоритма, в действительности, оказывается достаточно высоким, если использовать для программирования систему MatLab. Так расчет, показанный на рисунке 3.2, занимает на компьютере с низким быстродействием время  $\approx 1-2$  секунды.

Интегралы в формуле (2.42) можно считать по формуле трапеций, и сетку графического окна для параметров **A** и **B** достаточно выбирать размером 50×50. Описанный способ визуального определения величин **A** и **B** удобен для предварительного изучения поведения интегралов в формуле (2.42), но его недостатком является то, что он не поддается полной автоматизации программирования.

Для устранения этого противоречия воспользуемся соображениями, связанными с выбором максимальных энергий источника рентгеновского излучения и особенностями взаимодействия рентгеновских фотонов в различных диапазонах энергий. В результате будет разработана упрощенная физическая реализация предлагаемого способа.

### **3.4 Упрощенная физическая реализация способа обратных функций**

Дальнейший анализ проводим для используемого в ИДК диапазона высоких энергий рентгеновского излучения. Очевидно, что для максимальных энергий рентгеновского излучения, меньших 3 – 4 МэВ, но больших 1,022 МэВ, вклад эффекта рождения пар и фотоэффекта в ослабление рентгеновских фотонов с веществом крайне незначителен. Для подтверждения этого вывода была приведена серия расчетов зависимости  $Y_2(A, B)$  для максимальной энергии рентгеновского излучения  $E_{\max}=3,5$  МэВ в диапазоне изменения параметра **B** от 5 г/см<sup>2</sup> до 55 г/см<sup>2</sup>. Анализ результатов расчетов показал, что для диапазона изменения эффективного атомного номера  $Z$  вещества контроля от 5 до 82 зависимость  $Y_2(A, B)$  практически не зависит от **A**, расхождение не превосходит 0.3 %. На рисунке 3.3 приведен график функции  $Y_2(B)$ .

Зависимость  $Y_2(B)$  является достаточно гладкой, поэтому для ее описания можно подобрать высокоточную аппроксимацию. В работе [94] предложено для описания эффективного линейного коэффициента

ослабления рентгеновского излучения от толщины ослабляющего фильтра использовать смещенную гиперболу.

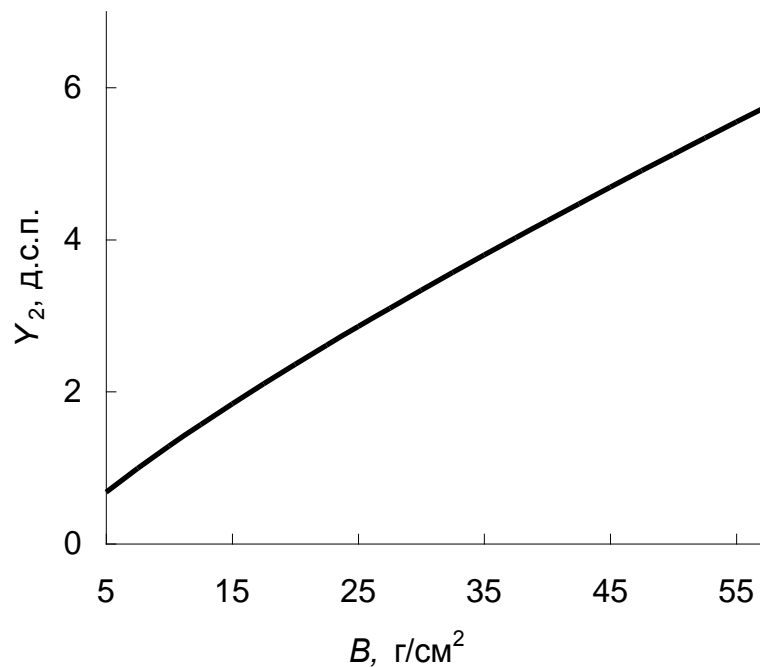


Рисунок 3.3 – Зависимость  $Y_2(A,B)$  для  $E_{\max}=3,5$  МэВ и  $5<Z<82$

Для повышения точности аппроксимации в гиперболическую зависимость из [94] нами была введена дополнительная поправка, в результате чего искомая аппроксимация функции  $Y_2(B)$  будет иметь вид

$$Y_2(B) = \left( \frac{1}{c_1 + c_2 B + c_3 B^2} + c_4 \right) B, \quad (3.12)$$

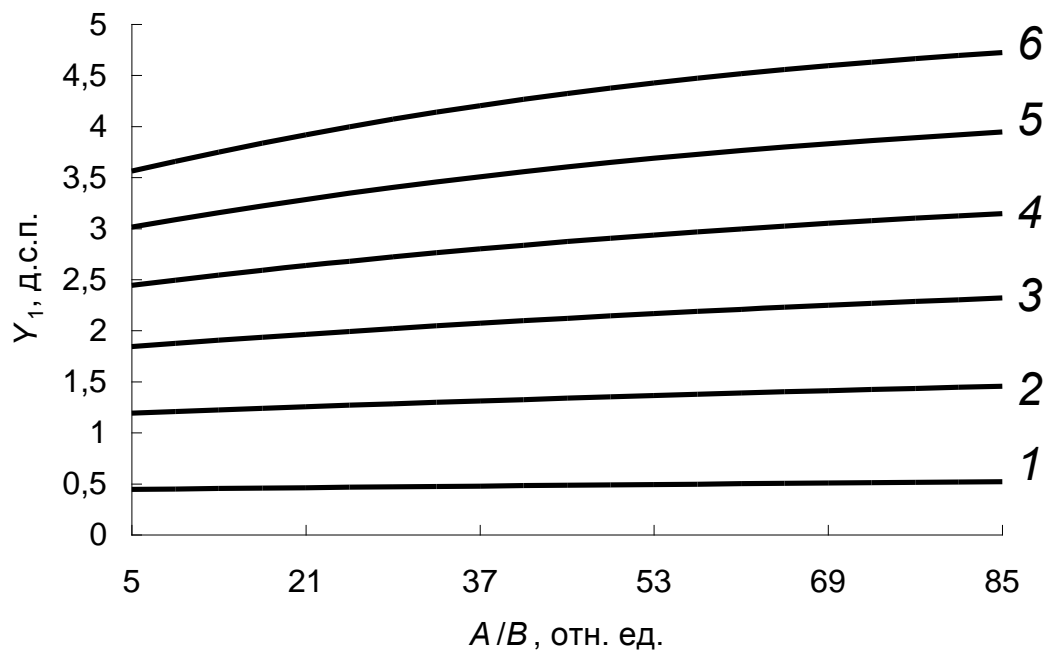
где  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – коэффициенты аппроксимации, которые не зависят от параметров МДЭ  $A$  и  $B$ . Во всей области изменения параметров  $A$  и  $B$  погрешность аппроксимации (3.12) не превосходит 0,3 %.

Аппроксимация (3.12) может быть использована для реализации метода обратных функций для нахождения значения параметра  $B$ , исходя из значения второго информативного параметра  $Y_2$ . Указанная реализация сводится к предварительному табулированию функции  $B(Y_2)$ .

В данном разделе принято, что первый информативный сигнал в высокоэнергетической реализации метода дуальных энергий формируется

для большей энергии. В настоящее время при реализации МДЭ в качестве высокоэнергетических источников рентгеновского излучения применяют бетатроны и линейные ускорители электронов. Максимальная энергия рентгеновского излучения в досмотровых комплексах не превышает 9 МэВ, так как, начиная с 10 МэВ, ускорители попадают во вторую группу с более жесткими гигиеническими требованиями к размещению и эксплуатации. Ограничимся серией расчетов зависимости  $Y_1(A, B)$  именно для этой максимальной энергии и диапазонов изменения параметров, указанных выше.

На рисунке 3.4 приведены графики типичных зависимостей  $Y_1(A, B)$  для нескольких уровней параметра  $B$ .



1 –  $B=10$  г/см<sup>2</sup>; 2 –  $B=30$  г/см<sup>2</sup>; 3 –  $B=50$  г/см<sup>2</sup>;  
4 –  $B=70$  г/см<sup>2</sup>; 5 –  $B=90$  г/см<sup>2</sup>; 6 –  $B=110$  г/см<sup>2</sup>

Рисунок 3.4 – Зависимость  $Y_1(A, B)$  для  $E_{\max}=9$  МэВ и  $5 < Z < 82$

Анализ результатов расчетов показал, что для аппроксимации зависимостей  $Y_1(A, B)$  при фиксированных значениях параметра  $B$  могут быть использованы полиномы третьей степени, трансформированные следующим образом

$$Y_1(A, B) = \left( p_1 + p_2 \frac{A}{B} + p_3 \left( \frac{A}{B} \right)^2 + p_4 \left( \frac{A}{B} \right)^3 \right) B, \quad (3.13)$$

где  $p_1, p_2, p_3, p_4$  – коэффициенты аппроксимации, зависящие от уровня параметра  $\mathbf{B}$ . Поточечная погрешность аппроксимации (3.13) для всей области изменения параметров  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  не превысила 0,02 %. Каждому уровню параметра  $\mathbf{B}$  будет соответствовать четверка чисел  $(p_1, p_2, p_3, p_4)$ .

Выражение (3.13) позволяет табулировать функции  $A(Y_1, B)$  для полного набора уровней параметра  $\mathbf{B}$ , необходимого для эффективного применения предлагаемого алгоритма.

Алгоритм определения параметров МДЭ, основанный на выражениях (2.42), (3.4) – (3.13), в предлагаемой модификации общего подхода будет состоять из двух основных этапов. На первом этапе по измеренному значению радиационной толщины для «низкой» энергии –  $Y_2$  находится с помощью дискретизации зависимости  $B(Y_2)$  значение параметра  $\mathbf{B}$ . При необходимости применяется линейная интерполяция. Для единичной оценки параметра  $\mathbf{B}$  необходимо не более 6 простейших арифметических операций и двух обменов с памятью. На втором этапе по измеренному значению второго информативного сигнала – радиационной толщины для «высокой» энергии –  $Y_1$  и оценки параметра  $\mathbf{B}$ , полученной на первом этапе, находится значение параметра  $\mathbf{A}$  с помощью табулированной функции  $A(Y_1, B)$ . При необходимости применяется двумерная линейная интерполяция. Для единичной оценки параметра  $\mathbf{A}$  необходимо не более 37 простейших арифметических операций и четырех обменов с памятью.

Все вышесказанное справедливо и для области низких энергий рентгеновского излучения с той лишь разницей, что первый информативный сигнал формируется для меньшей энергии и значимыми является другая пара эффектов взаимодействия фотонов с веществом.

Если максимальные энергии рентгеновского излучения  $E_1$  и  $E_2$  не удаётся подобрать по тем или иным соображениям таким образом, что для одной из них соответствующий информативный сигнал практически не

зависит от параметра  $\mathbf{A}$ , то можно рекомендовать общий подход к решению системы нелинейных интегральных параметрических уравнений (2.42), описанный выше.

Рассмотренные варианты решения системы нелинейных интегральных параметрических уравнений вида (2.42) используют информацию об энергетических спектрах рентгеновского излучения, энергетических зависимостях сечений взаимодействия фотонного излучения с веществом, энергетических зависимостях среднего значения поглощённой энергии зарегистрированного фотона. Точность указанных литературных данных для некоторых диапазонов энергий может быть весьма неудовлетворительной. Поэтому возникает необходимость в модификации предлагаемого способа на основе использования информации об ослаблении рентгеновского излучения фрагментами тестового объекта.

В алгоритме распознавания материала ОК и их фрагментов [51, 59] рекомендуют применять для калибровки тестовый объект из [95], который состоит из фрагментов с различными значениями параметров  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  из некоторых диапазонов, определяемых потребителем. В упомянутом алгоритме не используется в явном виде информация о параметрах  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ , а анализируется значения некоторого параметра распознавания. Из анализа предыдущего раздела можно сделать вывод о возможности реализации метода линий уровней на основе информации о тестовом объекте и ослаблении рентгеновского излучения фрагментами тестового объекта. В этом случае система уравнений (2.42) для определения параметров метода дуальных энергий  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  в явном виде не используется, поэтому предлагаемую реализацию способа логично назвать неявным способом обратных функций.

### 3.5 Неявный способ обратных функций для определения параметров метода дуальных энергий

Рассмотренная в предыдущем пункте реализация способа определения параметров МДЭ основана на аппроксимации второго информативного сигнала  $Y_2(B)$  с помощью выражения (3.12) и на аппроксимации первого информативного сигнала  $Y_1(A,B)$  при заданном значении  $B$  полиномом третьей степени (3.13). В предлагаемой же реализации анализируется вся совокупность первых и вторых информативных сигналов, полученных экспериментально в результате сканирования тестового объекта, состоящего из значительного количества фрагментов, узкими пучками рентгеновского излучения. Последовательность этапов модифицированного способа такая же, как и в предыдущем пункте.

Неявный способ обратных функций для определения параметров МДЭ является, по своей сути, новым подходом к распознаванию материалов ОК и их фрагментов. Предлагаемая реализация способа определения параметров МДЭ позволяет не только идентифицировать вещество ОК и его фрагментов по эффективному атомному номеру, но оценивать массовые характеристики всего объекта и его обособленных фрагментов. Разумеется, что к структуре ТО выдвигаются особые требования, но обсуждение этого вопроса выходит за рамки диссертационных исследований.

По быстродействию алгоритмы, описанные выше, сравнимы с алгоритмами из [81, 82], а по точности существенно их превосходят. Алгоритмы из [83] сравнимы с предлагаемыми алгоритмами по достижимой точности и уступают им в сотни раз по быстродействию. Эти два вывода свидетельствуют о необходимости применения анализируемых алгоритмов в системах ЦР и РВТ на основе метода дуальных энергий, так как они позволяют определять параметры МДЭ с высокой точностью за минимально возможное время.



### **3.6 Выводы по главе 3**

Предлагаемый способ определения параметров в методе дуальных энергий позволяет формировать 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. В результате применения разработанных способов повышается точность распознавания веществ объектов контроля и их обособленных фрагментов и возрастает производительность досмотрового контроля. Различные модификации способа определения параметров МДЭ отличаются высокой производительностью и способствуют повышению информативности метода.

## **ГЛАВА 4. РАСПОЗНАВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ И ИХ ФРАГМЕНТОВ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ ДЛЯ НИЗКОЙ МОЩНОСТИ ДОЗЫ**

Глава использует положения из работ [96, 97].

Таможенные и другие заинтересованные службы выдвигают высокие требования к производительности досмотрового контроля, которые в ряде случаев вступают в противоречие с одним или одновременно с двумя базовыми принципами проектирования рентгеновских средств досмотрового контроля. К указанным принципам относятся принципы физической и технической реализуемости.

Принцип физической реализуемости определяется наличием физических закономерностей, связывающих оцениваемый параметр (параметры) объекта с измеряемой физической величиной (величинами). Применительно к задачам досмотрового контроля, решаемым с помощью МДЭ, оцениваемым параметром объекта является эффективный атомный номер материала ОК его структурных фрагментов или другой параметр, связанный с ним функционально. Измеряемые физические величины в рассматриваемом случае – это значения энергии, поглощенной в радиометрических детекторах, для двух максимальных энергий рентгеновского излучения. Математическая формализация принципа физической реализуемости применительно к МДЭ достаточно подробно описана в научной литературе [59, 62–67, 98] и в главах 2 и 3.

Принцип технической реализуемости определяется наличием технических средств, с помощью которых можно решить поставленную задачу с заданной производительностью и необходимой точностью. Применительно к задаче распознавания материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов к упомянутым техническим средствам относятся досмотровые комплексы в целом.

На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований [68–70] доказано, что неправильный выбор конструкции ИДК в целом или того или иного составного элемента досмотрового комплекса сводит на нет даже самую принципиальную возможность решения задачи распознавания.

Дополнительным требованием [105–107], выдвигаемым в последнее время таможенными органами различных стран к досмотровым комплексам с функцией распознавания материалов крупногабаритных объектов и их фрагментов, является снижение мощности поглощенной дозы источника рентгеновского излучения до некоторого уровня.

Американский стандарт ANSI/HPS N 43.17–2009 определяет допустимую дозу на человека 0,25 мкЗв/час за одно сканирование, и при этом условии разрешает просвечивание кабины. Анализ, подтверждаемый спецификацией заказываемых американской компанией бетатронов, показывает, что радиационная безопасность в этом случае может быть обеспечена, если бетатрон генерирует 0,2–0,3 сГр/мин на оси пучка на 1 м от мишени.

В настоящий момент мощность поглощенной дозы для бетатрона МИБ 7,5 на расстоянии 1 м составляет от 5 до 10 Р/мин. Данный бетатрон в настоящее время наиболее часто применяется в ИДК. Снижение мощности дозы до указанных выше уровней на практике приведёт к тому, что количество зарегистрированных детектором фотонов при прочих равных условиях упадет при выполнении указанных требований в 15–30 раз. Возникает вопрос работоспособности инспекционных досмотровых комплексов и алгоритмов распознавания материалов ОК и их фрагментов при таких условиях.

#### **4.1 Основные требования**

К основным требованиям, предъявляемым к характеристикам модифицированного алгоритма распознавания материалов ОК и его

фрагментов высокоэнергетическим МДЭ для низкой мощности дозы, относятся требования к: разбиению совокупности материалов ОК на классы; вероятности распознавания материалов; диапазону изменения массовых толщин объектов досмотрового контроля и его фрагментов; скорости обработки откалиброванных радиографических изображений. Разбиение материалов на классы осуществляется по эффективному атомному номеру  $Z$ .

- Принимается следующее разбиение материалов ОК на классы:
  - органические материалы,  $5 \leq Z \leq 8$ ;
  - материалы, металлы и сплавы с малым значением  $Z$ ,  $11 \leq Z \leq 16$ ;
  - материалы, металлы и сплавы со средним значением  $Z$ ,  $23 \leq Z \leq 30$ ;
  - материалы, металлы и сплавы с высоким значением  $Z$ ,  $Z$  более 42.
- Вероятность распознавания материалов – более 95 %.
- Диапазон изменения массовых толщин  $\rho H$  объекта досмотрового контроля и его фрагментов – 20...120 г/см<sup>2</sup>.
- Поперечные размеры фрагмента ОК, материал которого должен быть распознан, 10 см;

Одновременно ИДК должен удовлетворять и следующему требованию, чтобы время обработки изображений специализированной программой, реализующей алгоритм распознавания материалов высокоэнергетическим МДЭ, включая метод сегментации, для одного изображения транспортного средства с грузом было менее 12 секунд, что обеспечивает примерную производительность ИДК 150 транспортных средств в час.

Дополнительно предъявляется ряд ограничений, связанных с технической реализацией досмотрового комплекса и схемой просвечивания,

- размер изображений 1600×4000 пикселей;
- скорость сканирования 2 м/с;
- мощность дозы бетатрона должна быть регулируемой с нижним пределом регулирования 0,2–0,3 Р/мин при частоте импульсов 300 Гц;
- расстояние от мишени источника излучения до тестовых образцов должно быть более 2,5 м;

– разрядность аналого-цифровых преобразователей 16.

#### 4.2 Проверяемые предположения и гипотезы, проблемные вопросы

При изменении мощности дозы источника высокоэнергетического излучения при прочих равных условиях изменяется только количество излучаемых фотонов. Энергетический спектр рентгеновского излучения, его угловое распределение в анализируемом случае остаются неизменными. Физические закономерности взаимодействия фотонного излучения с материалом объекта досмотрового контроля не зависят от мощности дозы источника излучения. Это означает, что определяющим принципом применительно к модернизации досмотрового комплекса с функцией распознавания материалов контролируемых объектов и их фрагментов методом дуальных энергий для малых мощностей доз излучения является принцип технической реализуемости. Именно с ним связаны основные проверяемые предположения и гипотезы, а также проблемные вопросы.

Введем понятие основного инварианта способа распознавания материалов методом дуальных энергий, которое должно существенно облегчить понимание сути анализируемой проблемы.

**Основным инвариантом способа распознавания материалов** методом дуальной энергии  $I_{\text{МДЭ}}$  назовем произведение мощности дозы излучения  $P$  на время формирования  $t$  пар строк первичных радиографических изображений и на площадь изображения части фрагмента  $S_{\gamma}$ , материал которого идентифицируется с вероятностью, большей  $\gamma$ .

Формула, соответствующая введенному определению, имеет вид

$$Inv = I_{\text{МДЭ}} = PS_{\gamma}t. \quad (4.1)$$

Площадь  $S_{\gamma}$  зависит от массовой толщины  $\rho H$ , материала анализируемого фрагмента, соответствующего числа зарегистрированных фотонов и т.д. Из анализа выражения (4.1) очевиден вывод о том, что поддержание инварианта  $I_{\text{МДЭ}}$  на заданном уровне обеспечивается при уменьшении мощности излучения пропорциональным увеличению либо

площади  $S_\gamma$ , либо времени измерения  $t$ . Из указанного вывода можно сформулировать основную проверяемую гипотезу.

**Проверяемая гипотеза.** Ухудшение качества распознавания материалов объектов и их фрагментов методом дуальных энергий, обусловленное уменьшением мощности дозы источника рентгеновского излучения, компенсируется уменьшением производительности контроля и (или) увеличением площади фрагмента ОК, материал которого идентифицируется с заданной степенью доверия.

Пусть в процессе экспериментальных исследований для мощности дозы излучения  $P_0$  получено, что материал фрагмента с площадью изображения  $S_{\gamma 0}$  идентифицируется с вероятностью  $\gamma$  для времени измерения  $t_0$ . В соответствии с проверяемой гипотезой запишем условие поддержания инварианта  $I_{\text{МДЭ}}$  (4.1) на одном и том же уровне для уменьшенной мощности дозы излучения  $P$

$$S_\gamma t = \frac{P_0 S_{\gamma 0} t_0}{P}. \quad (4.2)$$

В выражении (4.2)  $S_\gamma$  и  $t$  – требуемые значения площади фрагмента, распознаваемого с вероятностью  $\gamma$ , и времени измерения.

Максимальная производительность ИДК  $\Pi$  с функцией распознавания материалов МДЭ рассчитывается или оценивается экспериментальным путём для транспортных средств с усредненной длиной  $L$  и определяется временем формирования пар строк первичных радиографических изображений  $t$  и количеством столбцов  $M$  указанных изображений

$$\Pi = \frac{L}{Mt + T_0}, \quad (4.3)$$

здесь  $T_0$  – минимальный технологический промежуток времени между сканированием двух транспортных средств, следующих друг за другом. В досмотровых комплексах анализируемого типа применяются импульсные источники высокоэнергетического рентгеновского излучения, поэтому свяжем производительность  $\Pi$  с частотой  $\nu$  следования импульсов излучения.

Для формирования пары соответствующих друг другу строк двух первичных радиографических изображений необходим пакет импульсов. Указанный пакет импульсов состоит из  $k_L$  импульсов рентгеновского излучения с меньшей (низкой) энергией и  $k_H$  импульсов рентгеновского излучения с большей (высокой) энергией. С учетом сказанного выражение (4.3) примет вид

$$\Pi = \frac{\nu L}{M(k_L + k_H) + T_0 \nu}. \quad (4.4)$$

Производительность максимальна, если  $k_L=1$  и  $k_H=1$ . В главе 2 показано, что такое соотношение, как правило, не совсем соответствует оптимальному по критерию точности определения параметров МДЭ для распознавания материалов ОК.

Сведем воедино формулы (4.2) и (4.3) с учетом (4.4)

$$S_\gamma(k_L + k_H) = \frac{P_0 S_{\gamma 0}}{PM} \left( \frac{L}{\Pi_0} - T_0 \right). \quad (4.5)$$

Формулу (4.5) можно рассматривать как уравнение связи основных технических характеристик досмотрового комплекса с учётом возможного уменьшения мощности дозы рентгеновского излучения.

Следует отметить, что применительно к анализируемой задаче увеличение минимальной площади фрагмента объекта контроля, материал которого идентифицирует с заданной степенью доверия, является, как правило, более предпочтительным подходом, чем уменьшение производительности досмотрового контроля.

Обсудим возможные причины возникновения проблемных вопросов, связанные с уменьшением мощности дозы излучения. Будем считать, что реальная мощность дозы излучения в ИДК, работающих на базе малогабаритных импульсных бетатронов МИБ 4/7,5, составляет 7,5 Р/мин. По основным требованиям мощность дозы должна быть уменьшена до уровня 0,2–0,3 Р/мин, то есть в 16–25 раз. Это означает, что в диапазоне регулирования мощности дозы излучения от 0,2 до 7,5 Р/мин и сохранении

максимального значения массовой толщины ОК на уровне  $120 \text{ г/см}^2$  диапазон изменения радиометрического сигнала также увеличится в 16–25 раз.

Следует заметить, что в реально действующих установках досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объекта и его фрагментов используют высокоэнергетические источники тормозного излучения с неравномерным угловым распределением излучения. Указанный фактор дополнительно приводит к уменьшению аналоговых радиометрических сигналов от оси пучка к периферии в 3–4 раза.

Именно увеличение диапазона изменения радиометрического сигнала и приводит к возникновению нескольких проблемных вопросов. К основным проблемным вопросам следует отнести возможную нелинейность усилителей радиометрических сигналов и недостаточную разрядность АЦП. И тот и другой фактор приводит к появлению систематических погрешностей в исходных радиографических изображениях и к смещению значений того или иного параметра распознавания материалов и, как следствие, к некорректному распознаванию.

Рассмотрим подход к выбору разрядности АЦП для метода линий уровней с учетом всех замечаний, упомянутых выше.

В главе 2 подчёркнуто, что главным фактором, снижающим качество функционирования ИДК с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий, является снижение количества фотонов, регистрируемых единичным радиометрическим детектором.

Анализ результатов многочисленных экспериментов позволил конкретизировать этот вывод, разделив его на два одновременно связанных и одновременно независимых фактора.

1. Снижение числа регистрируемых фотонов приводит к ухудшению качества распознавания за счет увеличения доли квантовых шумов в исходных радиометрических сигналах.

2. Снижение числа регистрируемых фотонов обуславливает снижение аналогового сигнала до таких уровней, при которых происходит заметное



смещение оценки параметров распознавания материалов, вызванное оцифровкой аналоговых сигналов.

Выше уже подчеркнуто, что недостаточная разрядность АЦП относится к основным проблемным вопросам. Фактор 2 выделен отдельно потому, что он не связан непосредственно с проверяемой гипотезой. Это означает, что снижение качества распознавания материалов, вызванное уменьшением мощности дозы излучения с одновременной недостаточностью разрядности АЦП, не может быть компенсировано увеличением минимальной площади фрагмента ОК, материал которого идентифицирует с заданной степенью доверительной вероятности. Следует также отметить, что кратное увеличение времени формирования единичных строк исходных радиографических изображений для импульсных источников рентгеновского излучения приведет к частичной компенсации указанного негативного фактора только в случае аналогового суммирования. Но при этом могут увеличиться флуктуации аналогового сигнала, связанные с нестабильностью темнового тока детекторов. Заметного улучшения может не наблюдаться и потому, что для многих типов сцинтилляционных детекторов эффект послесвечения применительно к рассматриваемой задаче может оказаться значимым, а компенсация эффекта послесвечения может оказаться недостаточной.

#### **4.3 Влияние разрядности аналого-цифрового преобразователя на смещение информационных характеристик способа распознавания**

В главе 2 подробно рассмотрены вопросы, связанные с оценкой статистической погрешности параметров распознавания для двух основных способов: по эффективному атомному номеру и методом линий уровней. Метод линий уровней по ряду причин является более предпочтительным, поэтому именно для него и обсудим влияние разрядности аналого-цифрового преобразователя на смещение информационных характеристик способа

распознавания. Электронная промышленность в настоящее время выпускает высококачественные АЦП широкого применения с разрядностью до 24.

В статьях [61,62] продемонстрирован подход к выбору разрядности АЦП, но для способа распознавания методом линий уровней применить его затруднительно, и это будет показано ниже. Ситуация осложняется также увеличением диапазона изменения радиометрических сигналов при регулировании мощности поглощенной дозы в указанных выше пределах.

### 4.3.1 Вычисление параметра распознавания материалов

Пусть массовые толщины фрагментов досмотрового контроля  $\rho H$  изменяются в диапазоне от  $\rho H_{min}$  до  $\rho H_{max}$ . Эффективный атомный номер  $Z$  материала объекта принимает значения из множества  $Z$ . Уровни аналоговых радиометрических сигналов  $I_i(\rho H, Z)$  для максимальных энергий рентгеновского излучения  $E_i$ ,  $i=1,2$  могут быть оценены с помощью упрощенного выражения

$$I_i(\rho H, Z) = C_i P e^{-m_{eff}(\rho H, E_i, Z) \rho H}. \quad (4.5)$$

здесь  $C_i$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий вклад импульсов с  $i$ -ой максимальной энергией, коэффициент усиления АЦП, угловое распределение излучения и т.п.;  $m_{eff}(\rho H, E_i, Z)$  – эффективный массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ . Заметим, что в соответствии с формулами (2.15) выражение примет вид

$$I_i(\rho H, Z) = C_i P e^{-R_i(\rho H, Z)}. \quad (4.6)$$

Дискретные оценки параметров  $R_i(\rho H, Z)$ ,  $i=1,2$  находятся с помощью формул

$$\hat{R}_i(\rho H, Z) = \ln I_{di}(0, Z) - \ln I_{di}(\rho H, Z) = \ln \left[ \frac{I_i(0, Z)}{\Delta} \right] - \ln \left[ \frac{I_i(\rho H, Z)}{\Delta} \right], \quad (4.7)$$

здесь  $[x]$  – целая часть  $x$ ;  $I_i(0, Z)$  – сигнал с радиометрического детектора при отсутствии объекта;  $\Delta$  – интервал дискретизации. Индекс  $d$  в (4.7) указывает на цифровой сигнал. Интервал дискретизации  $\Delta$  связан с разрядностью АЦП

$k$  соотношением  $\frac{\max(I_1(0, Z), I_2(0, Z))}{f \times (2^k - 1)}$ ,  $f, f < 1$  – коэффициент, исключающий переполнение цифрового сигнала.

Для определенности будем считать  $E_2 > E_1$ . В этом случае  $I_2(0, Z) > I_1(0, Z)$ . В инспекционных досмотровых комплексах значение коэффициента  $f$  выбирается в диапазоне от 0,5 до 0,7. Выше подчеркнуто, что максимальная производительность достигается при формировании строк изображений для меньшей и большей максимальных энергий рентгеновского излучения по одному импульсу излучения. В соответствии с формулой (2.1) значение сигнала  $I_1(0, Z)$  вычисляется через  $I_2(0, Z)$  следующим образом

$$I_1(0, Z) = I_2(0, Z) \left( \frac{E_1}{E_2} \right)^3. \quad (4.8)$$

Показатель степени в выражении (4.8) может отличаться от 3, но это значение достаточно просто оценивается в результате обработки экспериментальных данных.

С помощью  $\hat{R}_i(\rho H, Z)$ ,  $i=1,2$  оценивается параметр распознавания  $Q$

$$\hat{Q}(\rho H, Z) = \frac{\hat{R}_2(\rho H, Z)}{\hat{R}_1(\rho H, Z)}. \quad (4.9)$$

После подстановки (4.7) в (4.9) получим

$$\hat{Q}(\rho H, Z) = \frac{\ln I_{d2}(0, Z) - \ln I_{d2}(\rho H, Z)}{\ln I_{d1}(0, Z) - \ln I_{d1}(\rho H, Z)}. \quad (4.10)$$

Выражение (4.10) позволяет оценить ожидаемое значение ПР для текущего значения мощности поглощенной дозы и заданной разрядности АЦП. Теоретическая оценка может быть осуществлена на основе исследований, приведенных в главе 2. Выражение (4.10) легко использовать и применительно к обработке результатов экспериментов.

Ниже обсудим подход к оценке смещения информативного ПР, обусловленного снижением мощности дозы излучения, базирующийся на выражении (4.10) и результатах экспериментов.

### 4.3.2 Подход к оценке смещения информативного параметра распознавания, обусловленного снижением мощности дозы излучения

Формула (4.10) является основой экспериментального подхода к оценке смещения информативного параметра распознавания, вызванного уменьшением мощности дозы излучения. Обсудим алгоритм ее применения.

В процессе экспериментальных исследований на первом этапе для двух максимальных энергий рентгеновского излучения формируются два цифровых радиографических изображения  $I_1$  и  $I_2$ . В результате анализа первичных радиографических изображений определяются средние значения радиометрических сигналов  $I_{d1}(0,Z)$ ,  $I_{d2}(0,Z)$  и  $I_{d1}(\rho H,Z)$ ,  $I_{d2}(\rho H,Z)$ . На следующем этапе оцениваются радиационные толщины фрагментов тестового объекта  $R_1(\rho H,Z)$  и  $R_2(\rho H,Z)$ . Калибровочные измерения для построения зависимостей  $Q(R_1,Z)$  проводятся для максимальной (номинальной) мощности дозы излучения  $P_{\max}$ .

Значение ПР  $Q(R_1, Z)$ , измеренное при уменьшенной дозе излучения  $P$ ,  $P < P_{\max}$ , позволяет отнести материал контролируемого фрагмента к  $k$ -ому классу, если указанное значение «близко» к  $Q(R_1, Z_k)$ . Напомним, что для рассматриваемой задачи  $Z_1=6$ ,  $Z_2=13$ ,  $Z_3=26$ ,  $Z_4=82$ . В методе линий материал относится к  $k$ -ому классу, если выполняется условие

$$U_-(R_1, Z_k) \leq Q(R_1, Z_k) \leq U_+(R_1, Z_k), \quad (4.11)$$

здесь  $U_-(R_1, Z_k)$ ,  $U_+(R_1, Z_k)$  – нижняя и верхняя линии уровня  $k$ -го класса материалов. Критерий, определяемый выражением (4.11), является общим для всей группы факторов, влияющих на качество распознавания материалов, поэтому ужесточим его

$$\begin{aligned} Q(R_1, Z_k) - \alpha_- \{Q(R_1, Z_k) - U_-(R_1, Z_k)\} &\leq Q(R_1, Z_k) \leq \\ &\leq Q(R_1, Z_k) + \alpha_+ \{U_+(R_1, Z_k) - Q(R_1, Z_k)\}, \end{aligned} \quad (4.12)$$

здесь  $\alpha_-$ ,  $\alpha_+$ ,  $0 < \alpha_- < 1$ ,  $0 < \alpha_+ < 1$  – коэффициенты, задаваемые потребителем. Для иллюстрации можно взять  $\alpha_- = \alpha_+ = 0,5$ .

Заметим, что описанный выше подход не зависит от причин уменьшения мощности дозы излучения. Подход применим для анализа

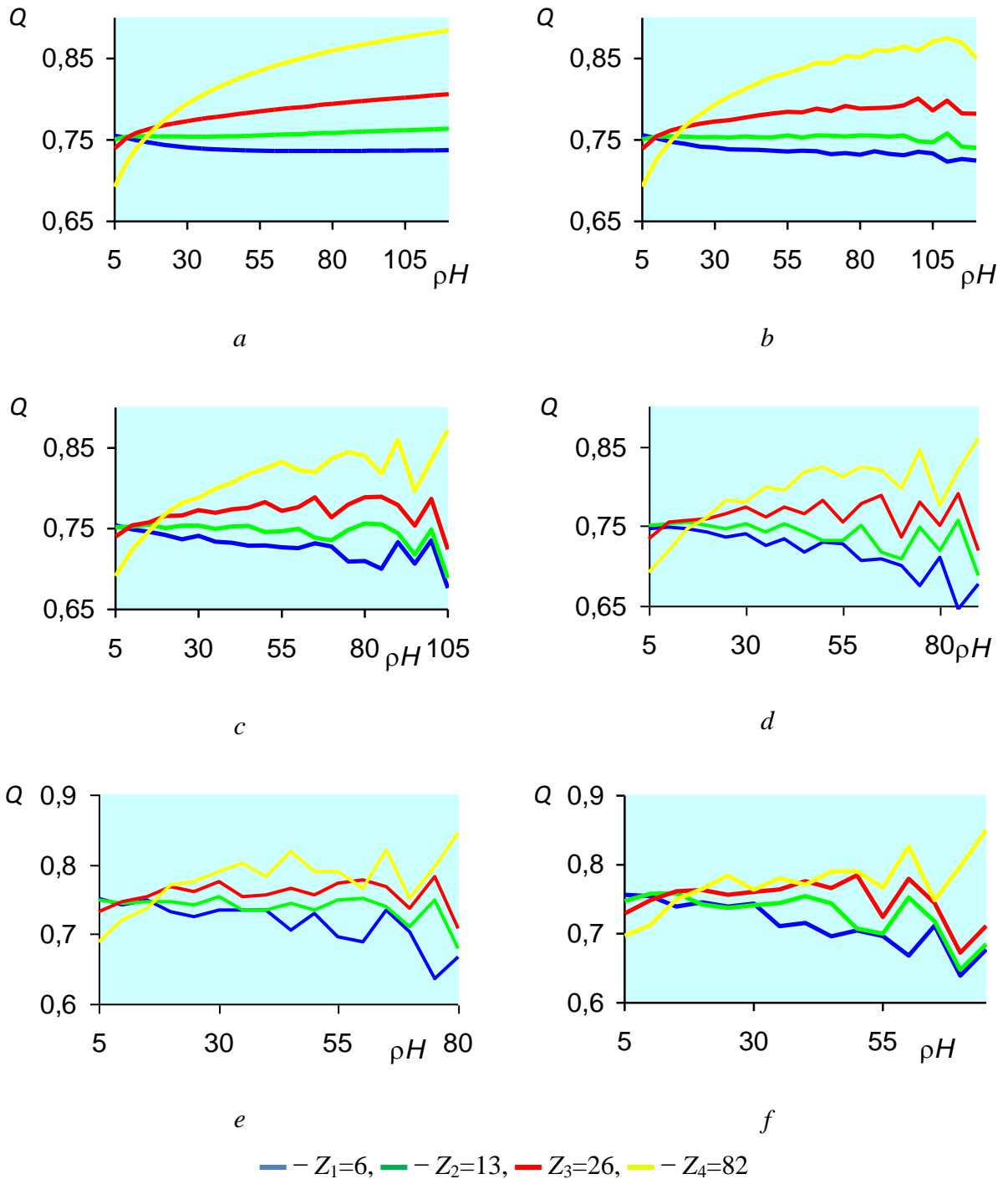
предельных возможностей сканирующих систем цифровой радиографии с функцией распознавания материалов объектов контроля методом дуальных энергий и их фрагментов в части, связанной с влиянием разрядности АЦП или нелинейности трактов усиления радиометрических сигналов на качество распознавания.

Проведем исследование влияния разрядности АЦП на качество распознавания материалов расчетным путем.

### **4.3.3 Исследование влияния разрядности аналого-цифровых преобразователей на качество распознавания материалов расчетным путем**

Для оценки влияния разрядности АЦП на качество распознавания материалов расчетным путем была проведена серия расчетов по формулам (4.6)–(4.12). Массовые толщины  $\rho H$  объектов контроля из углерода, алюминия, стали и свинца изменяли от 5 до 120 г/см<sup>2</sup> с шагом 5 г/см<sup>2</sup>. Единичный сцинтиллятор CsI имеет поперечные размеры 6×6 мм<sup>2</sup> и толщину 30 мм. Импульсы рентгеновского излучения с максимальной энергией 4 и 7,5 МэВ регистрируются по схеме 1+1. Разрядность АЦП  $k=16$ . Коэффициент  $f=0,56$ . Максимальной мощности дозы  $P_{max}$  соответствует целое число  $f(2^k-1)=36699$ . Так как максимальное значение мощности дозы 5 сГр/мин и предусматривается понижение до 0,25 сГр/мин. Это означает, что коэффициент уменьшения дозы  $k_p$  изменяется от 1 до 20.

На рисунке 4.1.a...4.e приведены результаты расчетов зависимостей  $Q(\rho H, Z_k)$ , здесь  $Z_1=6$ ,  $Z_2=13$ ,  $Z_3=26$ ,  $Z_4=82$ . Коэффициент  $k_p=1, 5, 10, 15, 20$ . Для сравнения на рисунке 4.a приведены идеализированные зависимости  $Q(\rho H, Z_k)$ , то есть рассчитанные для АЦП с гипотетической повышенной разрядностью  $k=28$ .



$a - k=28, k_p=1; b - k=16, k_p=5; c - k=16, k_p=10; d - k=16, k_p=15; e - k=16, k_p=20$

Рисунок 4.1 – Зависимости  $Q(\rho H, Z_k)$

Из анализа данных, приведенных на рисунке 4.1a...4.1f. следует, что уменьшение мощности дозы излучения приводит к сужению диапазона массовых толщин, для которого материалы уверенно распознаются. Например, уменьшение мощности дозы в 5 раз может привести к

неправильному распознаванию алюминия и органических материалов при толщинах, начиная с  $60 \text{ г/см}^2$ .

Для лучшего понимания при значении коэффициента  $k_p=10$  был проведен анализ зависимостей  $Q(\rho H, Z_k)$  с шагом по толщине  $0,5 \text{ г/см}^2$  в диапазоне толщин от  $20$  до  $80 \text{ г/см}^2$ . На рисунке 4.2 приведены результаты расчетов.

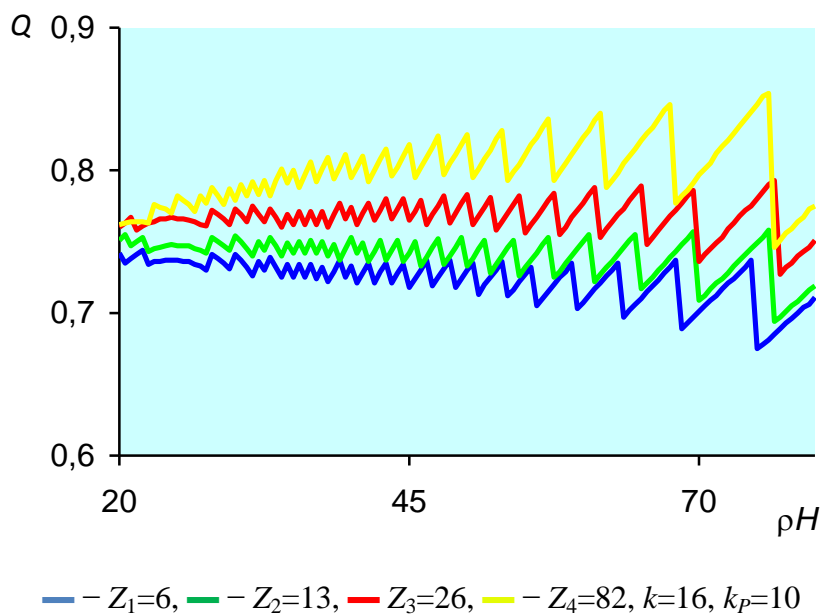
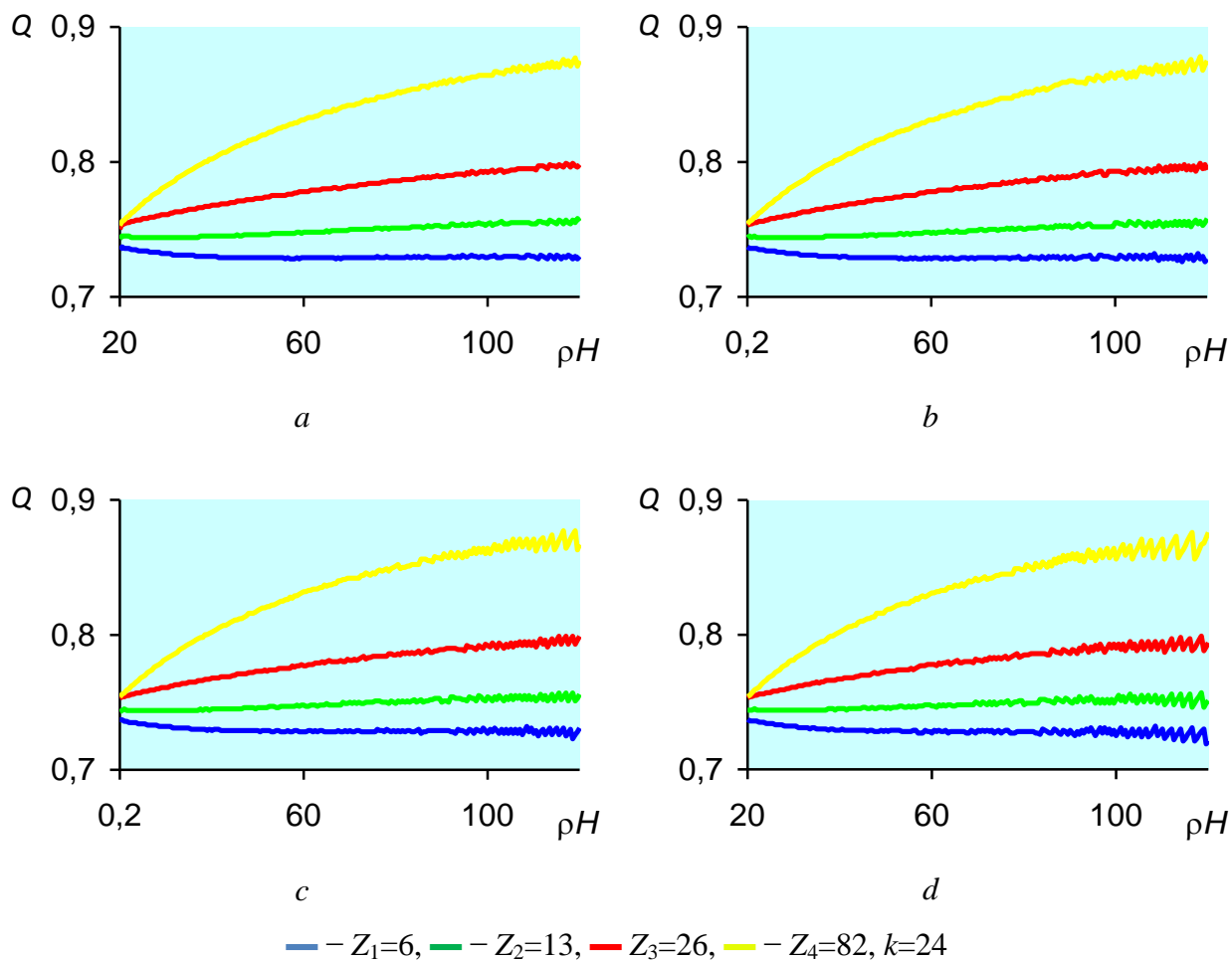


Рисунок 4.2 – Зависимости  $Q(\rho H, Z_k)$

Из анализа данных, представленных на рисунке 4.2, можно сделать однозначный вывод о том, что характер наблюдаемых смещений линий уровней связан с недостаточностью разрядности АЦП.

В последние годы в приборах, основанных на измерении ослабления или рассеяния рентгеновского излучения, применяются аналого-цифровые преобразователи с повышенной разрядностью. В работах [88, 89] описано применение АЦП с разрядностью  $k=24$ .

На рисунке 4.3 приведены результаты расчетов зависимостей  $Q(\rho H, Z_k)$  для АЦП с разрядностью  $k=20$  для коэффициентов уменьшения дозы  $k_p=10, 15, 20, 30$ . Из анализа данных, представленных на рисунке 4.3.a–4.3.d можно сделать вывод о достаточности количества разрядов АЦП  $k=20$  применительно к поставленной выше задаче.



—  $Z_1=6$ , —  $Z_2=13$ , —  $Z_3=26$ , —  $Z_4=82$ ,  $k=24$

$a - k_p=10$ ;  $b - k_p=15$ ;  $c - k_p=20$ ;  $d - k_p=30$

Рисунок 4.3 – Зависимости  $Q(\rho H, Z_k)$

#### 4.4 Экспериментальные исследования возможности распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий для малых доз излучения

Приведенный в предыдущем разделе подход позволяет оценить точности ПР методом дуальных энергий для любых доз излучения. Необходимо экспериментально проверить степень соответствия подхода реальным практическим условиям. Первичные радиографические изображения формировали на инспекционном досмотровом комплексе Томского политехнического университета для пары энергий 4 МэВ – 7,5 МэВ. Эксперименты проводили на штатной системе детектирования ИДК



ТПУ и детекторах (Detection Technology), предоставленных фирмой PowerScan (КНР).

Сканировали фрагменты тестового объекта досмотрового контроля из органических материалов (вода, плексиглас, капролон, дерево), алюминия, обыкновенной стали и свинца с массовой толщиной от 20 до 120 г/см<sup>2</sup>. Тестовый объект со сканером располагали в наиболее проблемной зоне – на максимальном удалении от оси пучка высокоэнергетического рентгеновского излучения.

Изображения метода дуальных энергий получали с помощью модифицированной программы Dual [108]. После модификации применительно к этим экспериментам программа Dual приобрела следующие возможности:

1. ввод и сохранение файлов с расширением xrd, в которых одновременно содержатся радиографические изображения с меньшей и большей энергией;
2. автоматическое раскрашивание изображения в соответствии с методом дуальных энергий;
3. переключение изображения для меньшей и большей энергий;
4. переключение из черно-белого режима в цветной режим;
5. переключение палитры из главного меню;
6. оценивание и передача в текстовый файл средних значений и среднеквадратичных отклонений параметров для двух энергий в выделенной пользователем прямоугольной области;
7. расчёт и занесение в память программы параметров калибровочных линий для соответствующего класса материалов.

Напомним, что калибровочные кривые аппроксимируются полиномами второго порядка.

Для более точной оценки параметров калибровочных линий тестовые объекты сканировались на скорости 4 см/с. Изображения формировались в режиме 1 импульс меньшей энергии, 1 импульс большей энергии. Для

подтверждения основной гипотезы на первом этапе необходимо оценить диапазон изменения уровней радиометрических сигналов при уменьшении мощности поглощенной дозы излучения, а на следующем этапе исследовать, как указанное изменение сказывается на качестве распознавания материалов из всех четырех классов материалов – органики, алюминия, стали и свинца.

#### **4.4.1 Диапазон изменения уровней радиометрических сигналов при уменьшении мощности поглощенной дозы излучения**

Регулирование мощности дозы излучения бетатронов производства Томского политехнического университета – МИБ-9 и МИБ-7,5 осуществляется с пульта управления. Мощность дозы излучения  $P$  в Р/мин измеряется с помощью встроенного монитора.

Для штатной системы детектирования максимальное значение радиометрического сигнала на оси пучка при  $P=2,5$  Р/мин для  $E_H=7,5$  МэВ составило 38000, среднее же значение радиометрического сигнала в зоне сканера – 10120. Для энергии  $E_L=4$  МэВ максимальный радиометрический сигнал на 4780, а сигнал в зоне сканирования – 2320. За фрагментом из свинца массовой толщиной  $\approx 102$  г/см<sup>2</sup> (90 мм) сигнал для энергии  $E_H=7,5$  МэВ составил 156 единиц, а для энергии  $E_H=4$  МэВ – 26 единиц.

Максимальное значение радиометрического сигнала на оси при  $P=1$  Р/мин для  $E_H=7,5$  МэВ составило 14704, в зоне сканера – 1903. Для энергии  $E_L=4$  МэВ соответственно 3987 и 930. За фрагментом из свинца массовой толщиной  $\approx 102$  г/см<sup>2</sup> (90 мм) сигнал для энергии  $E_H=7,5$  МэВ составил 67 единиц, а для энергии  $E_L=4$  МэВ – 11 единиц.

Отметим, что в первом и втором измерении уровень собственных шумов детекторов около 600 единиц.

Примерно такие же величины были получены и для детекторов Detection Technology.

Из приведенных выше данных следует, что уровень радиометрического сигнала с уменьшением мощности дозы излучения пропорционально

уменьшается. Отклонение от этого закона вызывается двумя факторами: низкой точностью измерения мощности поглощенной дозы монитором бетатрона, ограниченной разрядностью АЦП.

#### 4.4.2 Экспериментальная оценка качества распознавания материалов методом дуальных энергий (простые тестовые объекты)

В процессе экспериментальных исследований установлено, что для диапазона изменения массовых толщин  $\rho H$  фрагментов объекта контроля от 20 до 120 г/см<sup>2</sup> и  $Z \in \{6, 13, 26, 82\}$  радиационные толщины  $R_1$  для  $E_1=4$  МэВ изменяются от 1 до 5 длин свободного пробега (д.с.п.), а радиационные толщины  $R_2$  для  $E_2=7,5$  МэВ изменяются от 0,7 до 4,5 д.с.п.. За максимальное значение мощности дозы излучения брали  $P_{\max}=2,5$  Р/мин на расстоянии 1 м от источника излучения на оси пучка. В этом случае для зоны сканирования по воздуху  $I_{d1}=2320$ ,  $I_{d2}=10120$ . Зависимости  $Q(R_1)$  аппроксимировали параболой

$$Q(R_1) = a_0 + a_1 R_1 + a_2 R_1^2. \quad (4.13)$$

Экспериментальные оценки параметров аппроксимации  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ , полученные с помощью модифицированной программы Dual, приведены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Экспериментальные оценки параметров аппроксимации (4.13)  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ , штатная система детектирования

Z	$a_0$	$a_1$	$a_2$
6	0,74432	-0,00137	-0,0007
13	0,78134	-0,02658	0,00631
26	0,79869	-0,02331	0,00711
82	0,76753	0,01269	0,00501

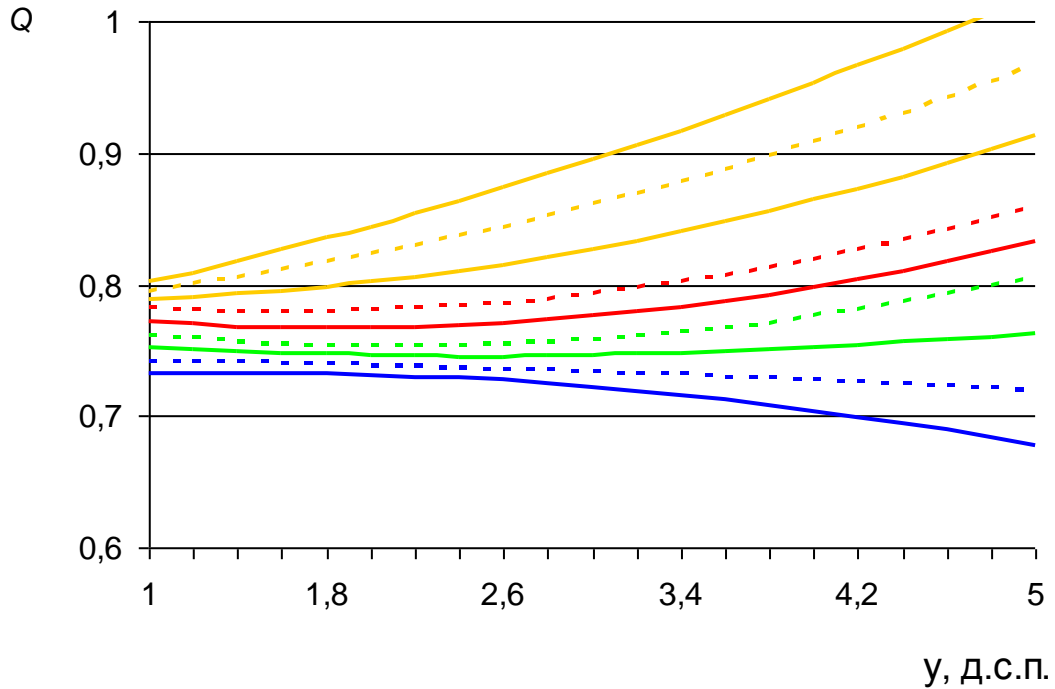
Таблица 4.2 – Экспериментальные оценки параметров аппроксимации (4.13)  $a_0, a_1, a_2$ , детекторы из КНР

$Z$	$a_0$	$a_1$	$a_2$
6	0,6802	-0,00023	-0,0007
13	0,7804	-0,01587	0,00428
26	0,85875	-0,03593	0,00781
82	0,7909	-0,02777	0,00101

Значительное различие калибровочных коэффициентов для детекторов из КНР и штатных детекторов можно объяснить несколькими факторами. К этим факторам можно отнести: различие в материале детекторов, больший поперечный размер детекторов, разными способами калибровок. Небольшой размер линейки детекторов из КНР не позволил провести полномасштабный цикл экспериментов, так как ТО на изображении были видны не полностью. Поэтому ниже приведены результаты анализа для штатной системы детектирования.

Увеличение систематической погрешности, обусловленной уменьшением мощности дозы излучения, может быть отслежено для всех распознаваемых материалов и анализируемого диапазона массовых толщин фрагментов. Влияние анализируемого фактора будем считать незначимым, если будет выполняться условие (4.12) с урвневными линиями, сформированными с помощью приближения (4.13) с набором параметров аппроксимации, приведенным в таблице 4.1. Зададимся наиболее грубыми значениями коэффициентов  $\alpha_-$ ,  $\alpha_+$  для условия (4.12), то есть  $\alpha_- = \alpha_+ = 1$ . В этом случае условие (4.12) совпадет с условием распознавания материалов, то есть с (4.11).

На рисунке 4.4 для иллюстрации приведены линии урвней (непрерывные линии) и калибровочные линии  $Q(R_1)$  (штриховые линии).



синий – органические материалы; зеленый – алюминий и сплавы;

красный – железо и сплавы; желтый – свинец и сплавы

Рисунок 4.4 – Линии уровней – непрерывные, калибровочные линии – пунктирные

В процессе исследований мощность экспозиционной дозы излучения  $P$  на оси пучка уменьшали от 2,5 до 0,3 Р/мин. Мощность дозы в зоне сканирования примерно в 3,8 раз меньше чем в центре. В таблице 4.3 приведены значения радиационной толщины  $R_1$  и параметра распознавания  $Q$ . Для удобства анализа результатов, приведенных в таблице 4.3, при правильном распознавании материала фрагмента была использована следующая цветовая палитра: синий цвет – органические материалы; зеленый – алюминий и сплавы; красный – сплавы железа; желтый – свинец и сплавы. Некорректное распознавание отмечено черным цветом. Усреднение производилось по всей площади изображения фрагмента без учета граничных эффектов.

Таблица 4.3 – Распознавание материалов фрагментов тестовых объектов при уменьшении мощности дозы излучения

Z	Материал	<i>P</i> , P/мин на оси пучка (в зоне сканера)							
		2,5 (0,665)		1 (0,266)		0,5 (0,133)		0,2–0,3 (0,053–0,08)	
		<i>R</i> <sub>1</sub>	Q	<i>R</i> <sub>1</sub>	Q	<i>R</i> <sub>1</sub>	Q	<i>R</i> <sub>1</sub>	Q
6	Капролон	0,8358	0,74173	0,8304	0,74150	0,6948	0,67544	–	–
		1,5147	0,74150	1,5080	0,74171	1,3931	0,72513	–	–
		2,2135	0,73458	2,1776	0,73746	2,1611	0,73467	–	–
		3,3298	0,73276	3,2649	0,73820	3,2226	0,74645	–	–
	Дерево (сосна)	0,6847	0,74297	0,6775	0,74283	0,6824	0,74057	0,6749	0,76409
		1,2380	0,74122	1,2468	0,74158	1,2332	0,74395	1,2394	0,74658
		1,7785	0,73880	1,8002	0,73489	1,7643	0,74534	1,7477	0,74874
		2,2766	0,73612	2,2519	0,74585	2,2557	0,74369	2,2872	0,72867
		2,7822	0,73275	2,8065	0,73095	2,8207	0,72422	2,7406	0,73966
		3,2438	0,73483	3,3448	0,71376	3,2861	0,72531	3,1274	0,75144
13	Al	0,8433	0,76100	0,8468	0,76452	0,8095	0,76778	0,8280	0,77502
		1,5920	0,75800	1,6059	0,75613	1,5839	0,76285	1,5709	0,76999
		3,4022	0,76070	3,4525	0,77793	3,3567	0,78681	3,4578	0,77751
26	Fe	0,4861	0,77592	0,4858	0,76862	0,4882	0,76582	0,4860	0,77617
		1,1349	0,77681	1,1341	0,77426	1,1392	0,77319	1,1355	0,78386
		2,1109	0,78361	2,1142	0,78049	2,1050	0,78572	2,1058	0,78570
		2,9786	0,79258	2,9546	0,79686	2,9447	0,80301	2,9406	0,79857
		3,7536	0,80897	3,7200	0,81339	3,5561	0,8460	3,4689	0,87406
		4,3138	0,84531	4,2839	0,84658	4,1478	0,87807	3,7423	0,96352
		4,9245	0,85487	4,7050	0,89355	4,2663	0,98441	3,9855	1,03136
82	Pb	1,5175	0,79454	1,5376	0,78604	1,5259	0,79097	–	–
		2,6269	0,83795	2,5956	0,804603	2,4109	0,90924	–	–
		3,0701	0,85022	3,0456	0,85394	3,0777	0,84960	–	–
		3,5279	0,87392	3,4862	0,88427	3,5538	0,87221	–	–
		3,9120	0,89282	3,9170	0,88615	3,6936	0,87787	–	–
		4,5821	0,91246	4,4539	0,93654	4,3531	0,94519	–	–
		4,8774	0,95578	4,6305	1,00448	4,5391	1,01160	–	–

Из анализа данных приведенных в таблице 4.3 можно сделать вывод о сужении диапазона массовой толщины фрагментов, для которых можно уверенно распознавать материал объекта контроля при уменьшении мощности дозы излучения. При  $P \approx 0,266$  Р/мин все анализируемые материалы уверенно распознаются в диапазоне массовых толщин от 20 до 100 г/см<sup>2</sup>, исключение фрагменты из свинца толщиной до 30 г/см<sup>2</sup>.

Дополнительно к простым ТО, состоящим из фрагментов с материалом из одного класса распознавания, необходимо проверить качество распознавания материалов фрагментов и для более сложных ТО. В таких объектах варьируется пространственное расположение фрагментов с материалами из различных классов. Массовые толщины фрагментов близки к 40 г/см<sup>2</sup>.

#### **4.4.3. Экспериментальная оценка качества распознавания материалов методом дуальных энергий (сложные тестовые объекты)**


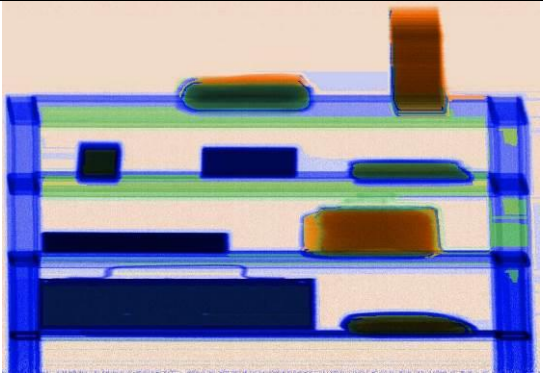
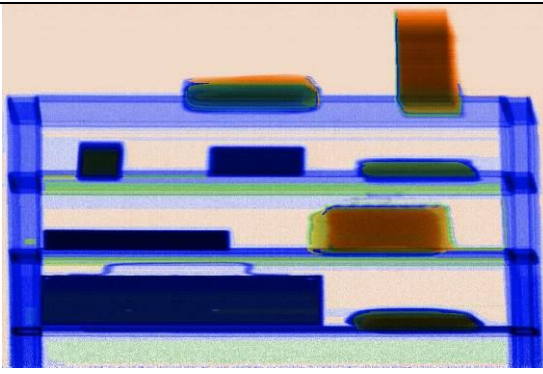
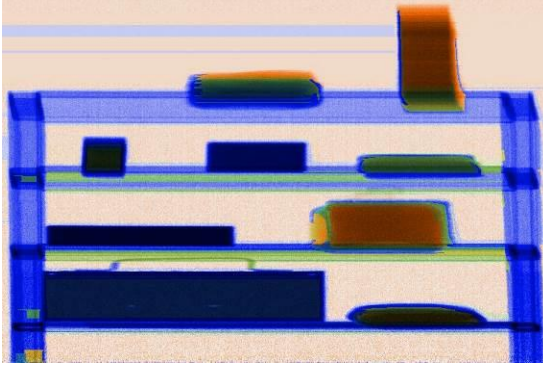
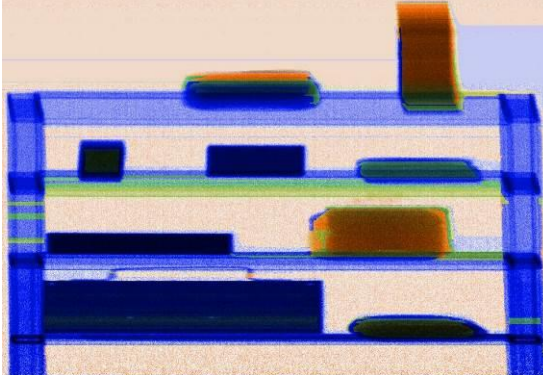
Экспериментально оценивалось качество распознавания следующих материалов: органические материалы – мука, капролон, вода; легкие металлы и неорганические материалы – алюминий, цемент, поваренная соль; металлы со средним значением эффективного атомного номера – сталь, медь; тяжелые металлы – свинец.

Условия измерений такие же, как и в предыдущем разделе. 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 из различных материалов по высоте. Нижние блоки детекторов работали при более низких уровнях мощности дозы излучения, чем центральные блоки. Для иллюстрации в таблицу 4.4 сведены конечные изображения метода дуальных энергий ТО.

Иллюстрации были получены с помощью модифицированной программы Dual с окном усреднения 5×5 пикселей, минимальный размер


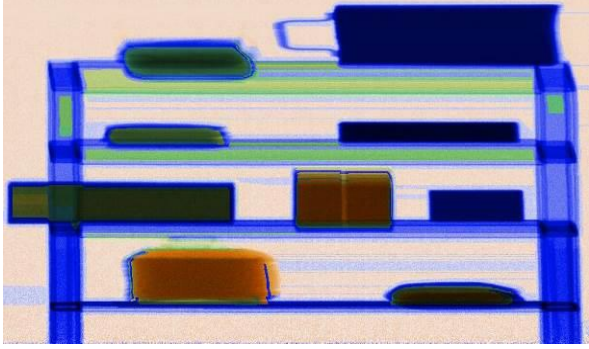
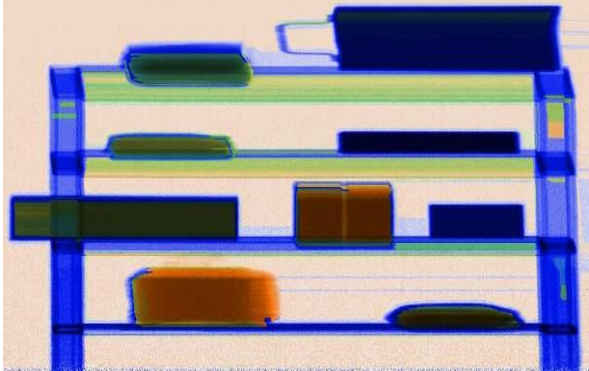
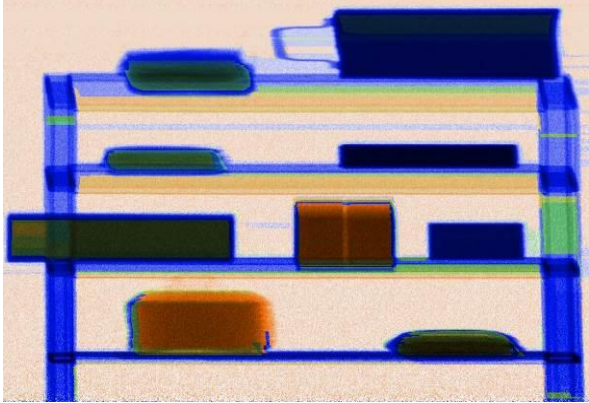
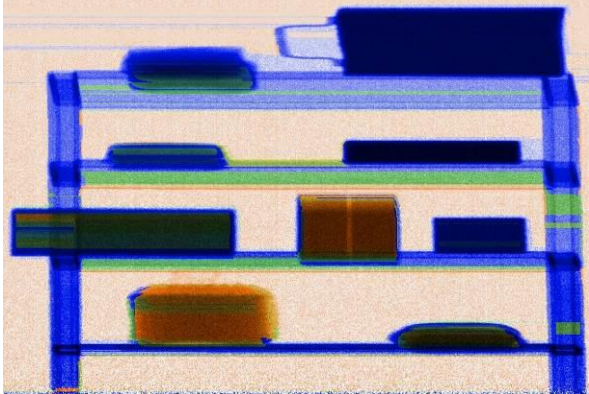
кластера –  $10 \times 10$  пикселей. Изображения раскрашены в соответствии с цветовой гаммой, используемой фирмой Smith Detection (Heimann).

Таблица 4.4 – Конечные изображения тестовых объектов


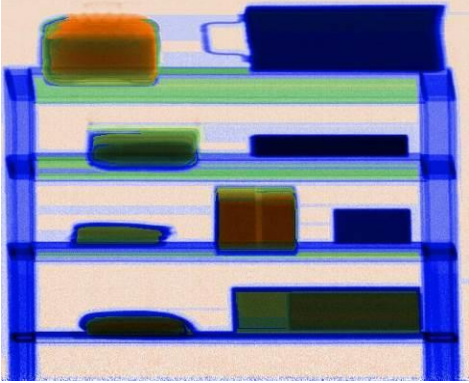
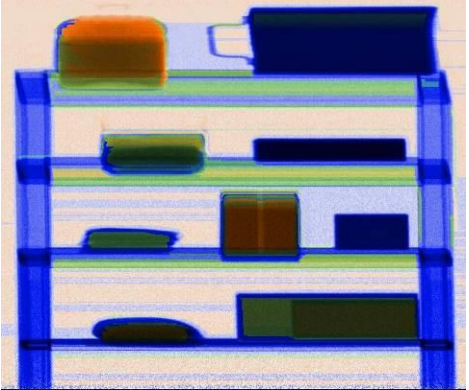
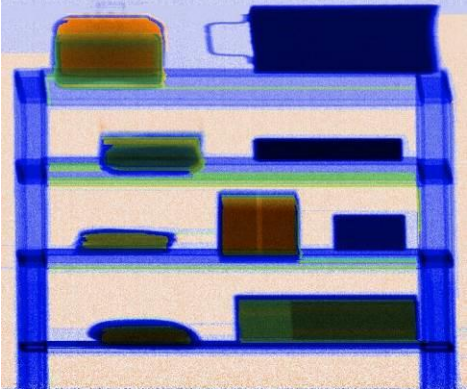
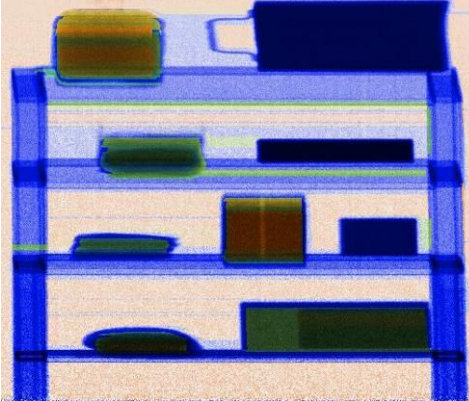
Объект 1	$P_{\max}$ , Р/мин	Изображение
	3	
	2	
	1	
	0,5	




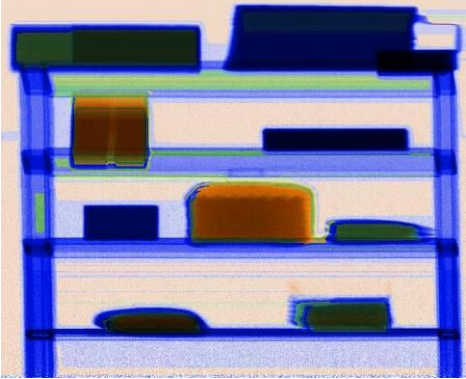
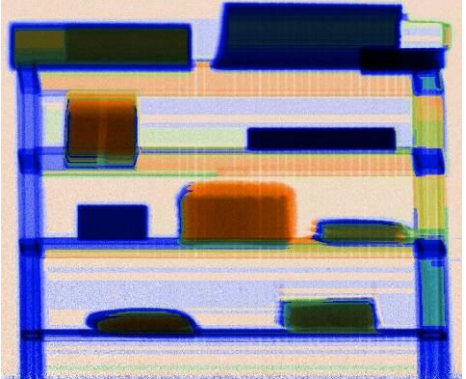
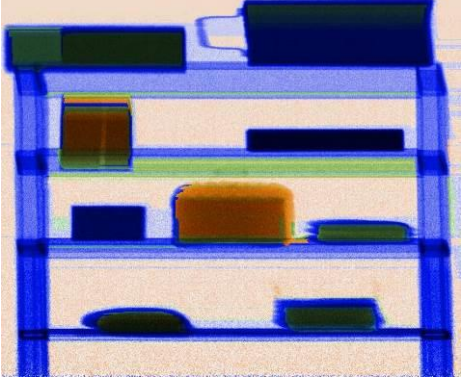
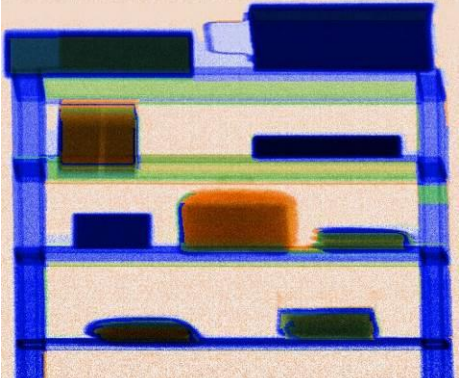
Продолжение таблицы 4.4

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


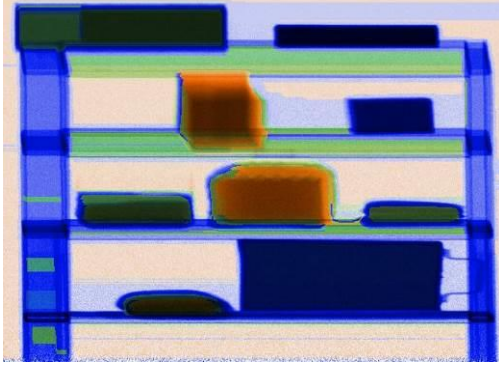
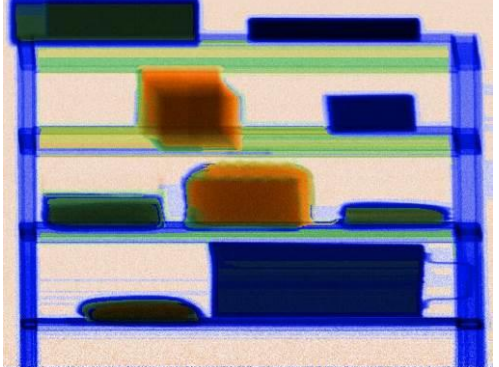
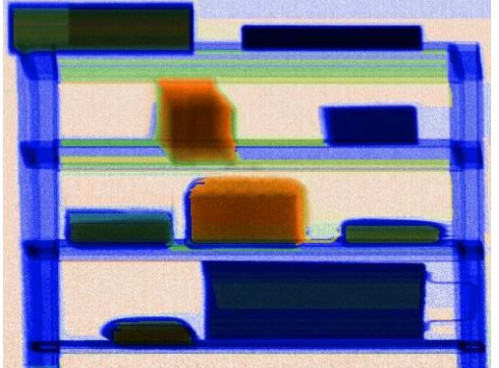
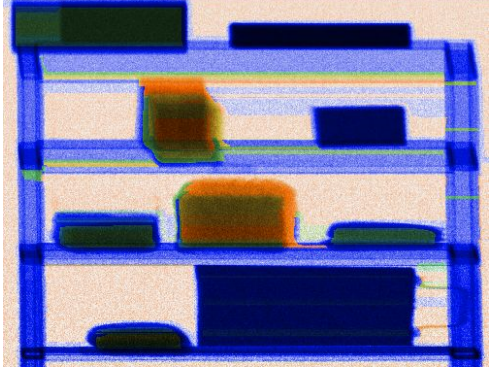
Продолжение таблицы 4.4

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


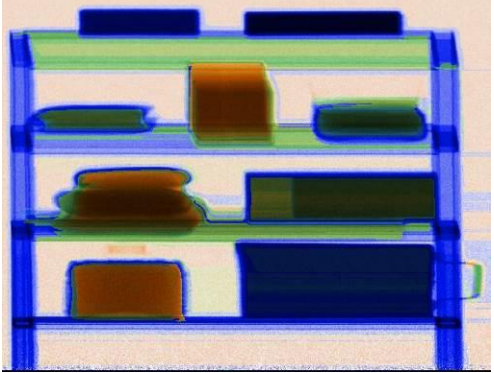
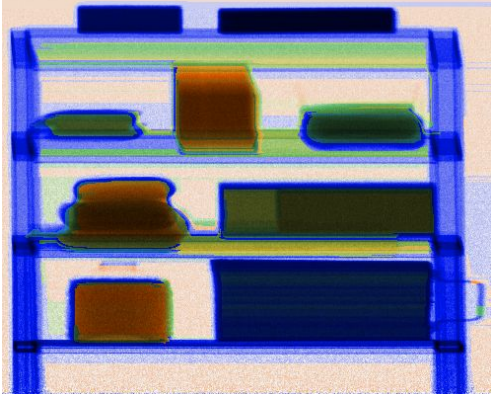
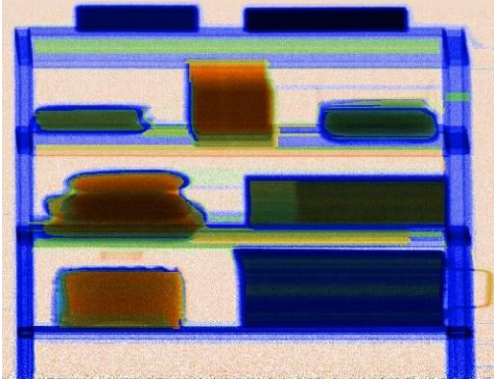
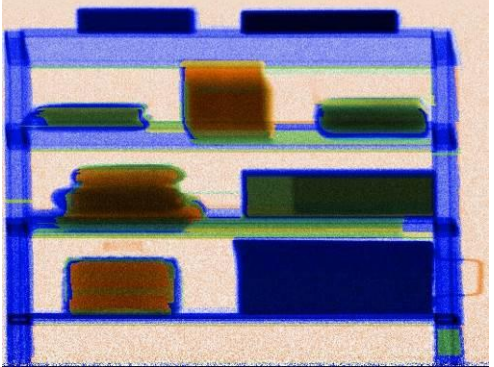
## Продолжение таблицы 4.4

Объект 4	$P_{\max}$ , Р/мин	Изображение
	3	
	2	
	1	
	0,5	


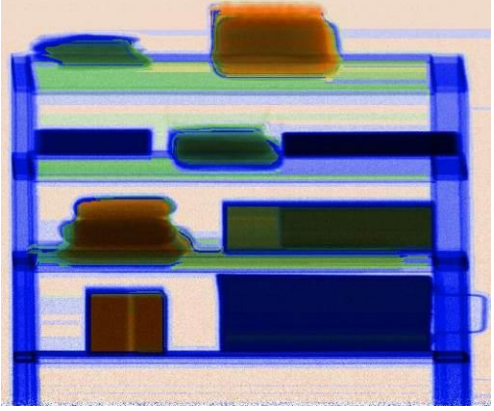
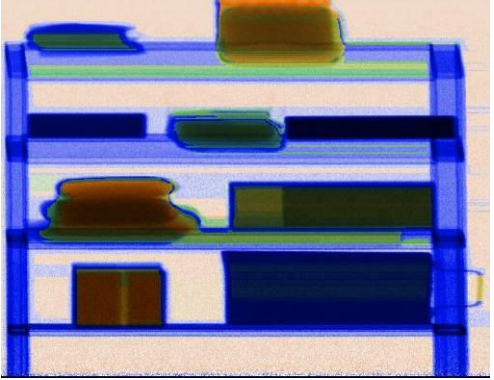
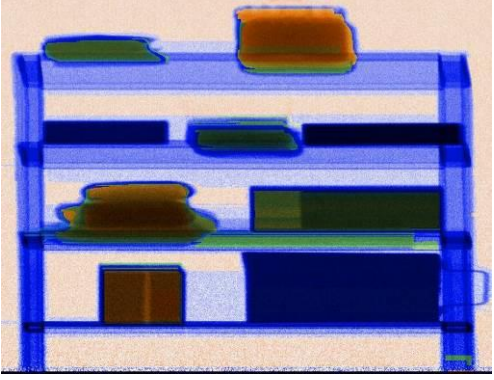
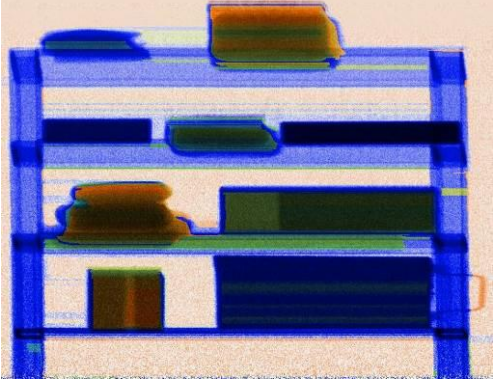
Продолжение таблицы 4.4

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


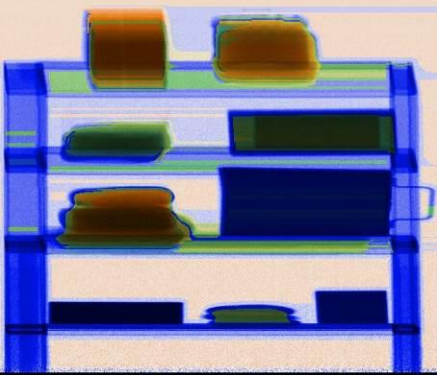
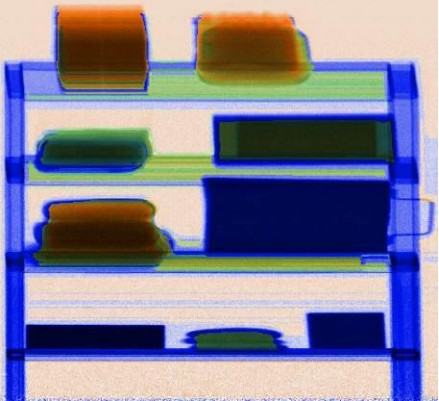
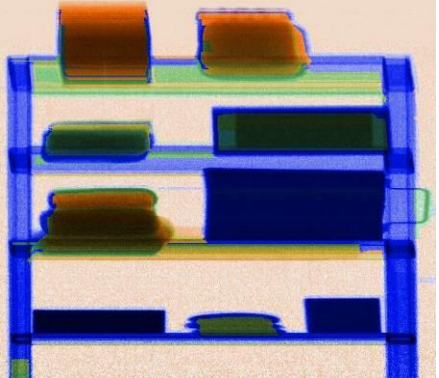
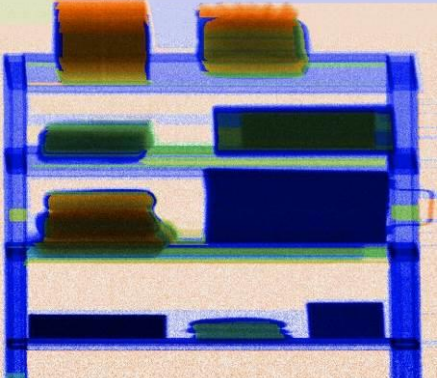
## Продолжение таблицы 4.4

Объект 6	$P_{\max}$ , P/мин	Изображение
	3	
	2	
	1	
	0,5	


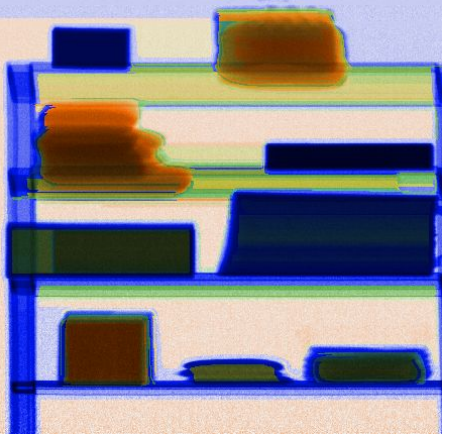
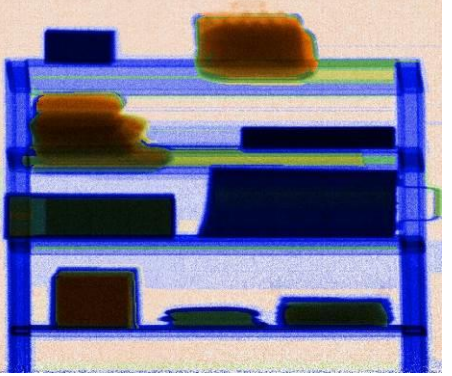
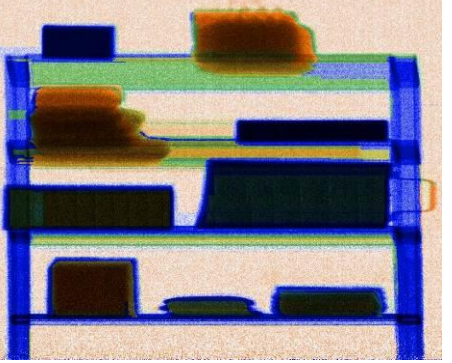
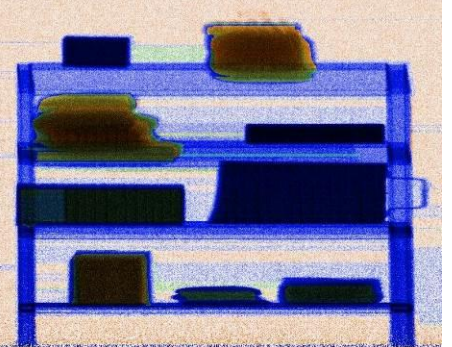
Продолжение таблицы 4.4

Объект 7	$P_{\max}$ , P/мин	Изображение
	3	
	2	
	1	
	0,5	

Продолжение таблицы 4.4

Объект 8	$P_{\max}$ , P/мин	Изображение
	3	
	2	
	1	
	0,5	

## Продолжение таблицы 4.4

Объект 9	$P_{\max}$ , Р/мин	Изображение
	3	
	2	
	1	
	0,5	



Из анализа изображений, приведенных в таблице 4.4 можно сделать ряд достаточно очевидных выводов.

1. При мощности дозы излучения 0,5 Р/мин уверенно распознаются:
  - органика при массовой толщине от 13 до 80 г/см<sup>2</sup>;
  - легкие металлы (Al) – от 11 до 80 г/см<sup>2</sup>;
  - металлы (Fe) – от 13 до 75 г/см<sup>2</sup>;
  - тяжелые металлы (Pb) – от 20 до 70 г/см<sup>2</sup>.
2. С уменьшением мощности дозы возрастают уровни шумов полутонных изображений и цветовые шумы.
3. С уменьшением мощности дозы нарушается цвет значительной части фрагментов.
4. Искажения более выражены для нижней части изображений.
5. Граничные эффекты, обусловленные усреднением и кластеризацией, наиболее проявляются для фрагментов, расположенных в верхней части тестовых объектов.
6. Размер фрагмента, материал которого идентифицирует с заданной вероятностью, зависит от положения фрагмента по вертикали и от его размера в направлении распространения рентгеновских квантов.
7. Фрагмент из меди в значительной части случаев относится к классу тяжелых металлов.

С выводом 6 связано увеличение объема фрагмента из муки для объектов 6 – 9. В тестовых объектах с первого по пятый изображение фрагмента из муки правильно не идентифицируется именно из-за ярко выраженных граничных эффектов.

Ниже покажем, что использование информации об эффективном атомном номере, получаемой с помощью одной из опций программы Dual позволяет в ряде случаев исключить неправильное распознавание фрагментов из меди.

Сравнение изображений из таблицы 4.4, сформированных для различных мощностей дозы рентгеновского излучения, носят качественный

характер. Выше сказано, что программа Dual позволяет сделать достаточно грубую оценку среднего значения эффективного атомного номера по любому прямоугольному участку изображения, раскрашенного с помощью метода дуальных энергий. Для количественного анализа высвечивается среднее значение и среднеквадратическое отклонение эффективного атомного номера. Для быстрой визуальной оценки результата распознавания имеется в нижней части рабочего окна программы квадрат, который окрашивается в соответствующий цвет. В этом случае удобно использовать фиксированную цветовую гамму. В нашем случае для этой цветовой гаммы органические материалы соотносятся с синим цветом, минеральные материалы и легкие металлы – с зеленым цветом, металлы со средним значением эффективного атомного номера – с красным цветом, тяжелые металлы – с желтым цветом.

В таблице 4.5 приведены количественные и качественные результаты распознавания материалов фрагментов тестовых объектов. В таблице указаны средние значения эффективных атомных номеров материалов фрагментов, цвет цифр указывает на класс материалов.

Из анализа результатов, приведенных в таблице 4.5, можно сделать вывод о возможности использования информации об эффективном атомном номере для коррекции распознавания материалов фрагментов из меди. Это связано с тем, что оценки эффективного атомного номера для медных фрагментов ближе к оценкам эффективного атомного номера для фрагментов из стали, чем к оценкам эффективного атомного номера для фрагментов из свинца.

Увеличение размеров фрагментов из муки в направлении сканирования, существенно уменьшающее граничный эффект, приводит к правильному распознаванию материала указанных фрагментов. С учетом того, что мощность дозы рентгеновского излучения на периферии в 2–3 раза меньше, чем по центру пучка, можно сделать заключение о правильности распознавания материалов фрагментов объектов контроля при уменьшении мощности дозы до уровня 0,25–0,3 Р/мин. Разумеется, сказанное выше справедливо при должном поперечном размере фрагментов объектов контроля.

Таблица 4.5 – Количественные и качественные результаты распознавания материалов фрагментов тестовых объектов по эффективному атомному номеру

№ объекта	Материал	Мощность дозы излучения, Р/мин				Примечание
		3	2	1	0,5	
1	Мука	10,2	10,4	10,4	10,8	Мал размер по вертикали
	Капролон	4,5	4,5	4,0	4,0	
	Вода	6,0	6,3	4,9	6,1	
	Цемент	18,0	19,8	19,4	21,4	Коррекция распознавания
	Соль	16,4	16,3	16,0	19,4	
	Алюминий	16,3	18,0	14,3	16,5	
	Сталь	24,9	25,7	24,0	26,3	
	Медь	31,7	32,9	32,8	33,1	
	Свинец	51,9	53,3	49,5	52,2	
2	Мука	9,3	9,4	11,2	9,7	Мал размер по вертикали
	Капролон	5,3	4,9	5,2	4,7	
	Вода	5,5	5,2	5,6	6,1	
	Цемент	17,4	18,1	18,8	22,7	
	Соль	15,8	14,3	16,0	21,1	
	Алюминий	13,5	13,2	13,3	17,0	
	Сталь	30,5	28,8	28,4	33,1	
	Медь	31,2	29,5	27,9	28	
	Свинец	58,8	56,8	57,8	62,8	
3	Мука	9,7	9,6	10,7	11,2	Мал размер по вертикали
	Капролон	5,2	5,5	6,1	6,2	
	Вода	7,7	7,8	8,3	8,3	
	Цемент	16,1	15,8	19,1	16,9	
	Соль	15,4	16,7	12,5	16,7	
	Алюминий	13,6	12,8	14,8	15,8	
	Сталь	29,7	29,6	31,2	29,8	
	Медь	30,2	30,9	31,8	30,1	
	Свинец	56,3	56,0	58,2	61,2	

Продолжение таблицы 4.5

№ объекта	Материал	Мощность дозы излучения, Р/мин				Примечание
		3	2	1	0,5	
4	Мука	8,5	8,7	11,4	7,7	Мал размер по вертикали
	Капролон	5,2	5,8	6,2	4,6	
	Вода	5,4	5,1	5,8	5,2	
	Цемент	16,2	14,1	15,1	16,5	
	Соль	13,8	13,8	15,0	14,5	
	Алюминий	16,5	13,8	16,0	17,7	
	Сталь	28,2	24,4	27,6	30,0	
	Медь	29,3	30,3	32,6	33,5	
	Свинец	53,5	58,7	57,0	59,5	
5	Мука	10,3	9,1	9,6	11,2	Мал размер по вертикали
	Капролон	4,5	4,6	4,5	5,8	
	Вода	5,2	6,2	5,5	8,5	
	Цемент	15,0	16,5	16,7	16,8	
	Соль	14,5	14,5	15,5	18,9	
	Алюминий	16,4	16,4	13,2	16,8	
	Сталь	25,9	25,3	24,2	29,0	
	Медь	32,3	32,5	31,7	32,9	
	Свинец	60,0	59,8	56,0	55,6	
6	Мука	7,8	7,2	6,7	7,0	
	Капролон	4,3	4,4	4,7	6,1	
	Вода	6,7	6,2	6,4	5,1	
	Цемент	16,6	16,7	16,6	15,2	
	Соль	15,8	14,2	14,0	15,7	
	Алюминий	13,7	12,3	13,3	14,8	
	Сталь	25,9	24,4	25,0	27,9	
	Медь	37,7	37,4	38,7	44,0	Коррекция распознавания
	Свинец	61,0	60,1	60,5	53,8	
7	Мука	7,0	8,6	6,9	6,9	
	Капролон	5,8	5,8	6,1	6,6	
	Вода	8,1	6,6	6,4	7,1	
	Цемент	17,1	16,5	17,0	15,7	
	Соль	18,0	17,7	14,7	15,9	
	Алюминий	13,4	13,4	14,7	16,3	
	Сталь	26,6	25,5	27,8	25,6	
	Медь	35,0	31,2	36,1	31,2	Коррекция распознавания
	Свинец	56,9	54,4	60,9	55,3	

Продолжение таблицы 4.5

№ объекта	Материал	Мощность дозы излучения, Р/мин				Примечание
		3	2	1	0,5	
8	Мука	7,6	7,6	7,9	7,2	
	Капролон	6,0	6,1	5,8	5,9	
	Вода	7,0	6,8	7,0	6,2	
	Цемент	17,2	17,3	17,6	17,4	
	Соль	14,7	17,0	13,4	18,5	
	Алюминий	14,2	14,1	16,7	16,3	
	Сталь	26,2	27,1	27,5	29,3	
	Медь	28,9	28,1	28,5	32,0	
	Свинец	51,5	50,2	49,2	52,0	
9	Мука	5,7	5,8	5,4	6,4	
	Капролон	4,7	4,7	4,2	8,4	
	Вода	6,1	5,5	4,4	6,0	
	Цемент	14,2	14,5	12,2	16,9	
	Соль	14,1	16,4	13,3	18,1	
	Алюминий	14,1	16,7	10,6	16,1	
	Сталь	24,3	26,1	23,8	27,6	
	Медь	37,6	34,4	30,9	32,2	Коррекция распознавания
	Свинец	56,1	58,0	56,0	54,4	

#### 4.5 Выводы по главе 4

В главе обсуждены основные проблемы распознавания материалов объектов досмотрового контроля методом дуальных энергий, связанные с уменьшением мощности поглощенной дозы излучения. Показано, что для рассматриваемой задачи существенно изменяется диапазон изменения радиометрических сигналов, в результате чего уменьшается толщина фрагментов, материалы которых распознаются с заданной вероятностью. Указанный фактор наиболее значим для периферийных блоков радиометрических детекторов, то есть расположенных на значительном удалении от оси пучка рентгеновского излучения.

Введен инвариант способа распознавания материалов, позволяющий связать качество распознавания с производительностью контроля и площадью фрагмента объекта контроля, материал которого идентифицируется с заданной вероятностью. Показано, что в рамках поставленной задачи единственным подходом, позволяющим сохранить качество распознавания на заданном уровне, является увеличение минимальной площади фрагмента.

Приведена совокупность выражений, позволяющих связать основные характеристики комплекса досмотрового контроля с точностью распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов. Для способов распознавания материалов по эффективному атомному номеру и методом линий уровней методика расчета статистической погрешности параметра распознавания проверена экспериментально, сопоставление теоретических и экспериментальных результатов показало удовлетворительное согласие.

Приведен подход к оценке влияния разрядности аналого-цифрового преобразователя на смещение информативных характеристик метода распознавания.

Экспериментально доказана возможность удовлетворительного распознавания материалов объектов досмотрового контроля при уровнях мощности дозы рентгеновского излучения около 0,25 Р/мин. В этом случае существенно снижается диапазон толщин фрагментов объекта контроля, материалы которых надежно распознаются. Увеличение усредняемой площади несколько уменьшает влияние недостаточной разрядности АЦП на качество распознавания, но этот эффект является незначительным. Для того, чтобы распознавать материалы фрагментов объектов контроля в условиях меняющейся мощности дозы без подстройки калибровочных коэффициентов метода распознавания, безусловно, необходимо увеличение разрядности АЦП.

Доказано существенное влияние граничных эффектов на качество распознавания материалов.

## **ГЛАВА 5. АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ МЕТОДАМИ ВЫСОКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ**

В досмотровом контроле, а также в ряде задач неразрушающего контроля промышленных изделий, необходимо оценить массу крупногабаритного объекта контроля или его фрагментов в условиях отсутствия возможности прямого доступа к объекту. Известны многочисленные патенты, посвященные измерению массы объектов с различными габаритами с помощью источников гамма- и рентгеновского излучения, например, [109, 110]. В указанных патентах проекция объекта контроля на поверхность радиографического изображения (лобовую поверхность радиометрического детектора) не выходит за ее границы. На смещение оценки параметров ОК рентгеновским способом существенным образом влияют размеры объекта и его форма. В настоящее время получили широкое распространение различные реализации ЦР и РВТ [74, 111, 112], в том числе и метод дуальных энергий, позволяющий определить эффективный атомный номер вещества контролируемого объекта. В литературе недостаточно данных для разработки физически корректных алгоритмов измерения массы крупногабаритного ОК с известными параметрами методом цифровой радиографии и оценки массы объектов досмотрового контроля и его фрагментов методом дуальных энергий в условиях информационной неопределенности. Разработка алгоритмов оценки массы, в полной мере учитывающих особенности взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, позволит существенно расширить возможности досмотрового контроля и контроля других объектов.

## 5.1 Основы алгоритма измерения массы объекта методом цифровой радиографии

Кратко рассмотрим процесс формирования первичных изображений в сканирующих системах цифровой радиографии [74, 112]. На первом этапе можно считать источник рентгеновского излучения линейным мононаправленным. Пусть центры идентичных радиометрических детекторов расположены в линию. Линейка детекторов является плотной, это означает, что зазоры между чувствительными объемами детекторов практически отсутствуют. Будем считать, что объект контроля перемещается между системой источник излучения – линейка радиометрических детекторов прямолинейно с постоянной скоростью  $V$ . Логично связать размер единичного детектора в направлении сканирования  $\Delta x$  со скоростью сканирования  $V$  и временем формирования строки первичного радиографического изображения  $\Delta t$  следующим простейшим соотношением  $\Delta x = V \Delta t$ . Проекция ОК на линейку радиометрических детекторов не выходит за внешнюю границу линейки.

Для удобства описания процесса формирования исходных радиографических изображений введем систему координат, в которой начало координат  $O$  свяжем с центром крайнего детектора в начальный момент времени. Ось  $OX$  проходит через центры радиометрических детекторов, а направление оси  $OY$  совпадает с направлением сканирования.

Полностью сформированное исходное радиографическое изображение представляет собой матрицу  $Y$  с размерностью  $I \times J$ , где  $I$  – число элементов в строке (направление  $OX$ ), а  $J$  – число элементов в столбце (направление  $OY$ ). В формализованном виде матрица  $Y$  описывается выражением

$$Y = \{Y_{ij} : i = 1, I; j = 1, J\}. \quad (5.1)$$

Элемент матрицы (5.1)  $Y$  в точке с координатами  $i, j$  представляет собой значение сигнала с  $i$ -го радиометрического детектора линейки, сформированного на интервале времени от  $(j-1)\Delta t$  до  $j\Delta t$ . Для удобства



назовем линией  $ij$  линией, перпендикулярную плоскости изображения и проходящую через центр  $i$ -го детектора в момент времени, связанный с координатой  $j$ . Толщину объекта контроля по линии  $ij$  обозначим символом  $H_{ij}$ . С учетом введенного обозначения выражение для описания элемента изображения в точке с координатами  $i, j$  будет иметь вид

$$Y_{ij} = \Delta t \int_0^{E_{\max}} S(E, E_{\max}) e^{-\int_0^{H_{ij}} \mu_{ij}(E, h) dh} dE, \quad (5.2)$$

где  $S(E, E_{\max})$  – распределение поглощенной энергии рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_{\max}$  в радиометрическом детекторе по энергии  $E$ ;  $\mu_{ij}(E, h)$  – распределение линейного коэффициента ослабления фотонного излучения с энергией  $E$  материалом ОК по линии  $ij$ . Заметим, что выражение (5.2) не учитывает наличие темновых токов детекторов ионизирующего излучения. На практике их исключение достигается специальной калибровкой, называемой калибровкой по «черному».

Значения сигналов  $Y_{ij}$  оцифровываются, далее производятся все необходимые калибровки и логарифмирование. После трансформации (5.2) получаем формулу для определения элемента  $R_{ij}$  результирующего цифрового радиографического изображения  $\mathbf{R}$

$$R_{ij} = -\ln \frac{\left[ \Delta t \int_0^{E_{\max}} S(E, E_{\max}) e^{-\int_0^{H_{ij}} \mu_{ij}(E, h) dh} dE / \Delta \right]}{\left[ \Delta t \int_0^{E_{\max}} S(E, E_{\max}) dE / \Delta \right]}, \quad (5.3)$$

здесь  $[x]$  означает целую часть числа  $x$ , а  $\Delta$  – интервал квантования. Из анализа (5.3) следует, что  $R_{ij}$  представляет собой толщину ОК по линии  $ij$ , измеряемую в средних длинах свободного пробега (д.с.п.) рентгеновского излучения.

Принципиальная возможность оценки массы объекта контроля заключается в представлении ЛКО для диапазона энергий, в котором

преимущественным видом взаимодействия фотонов гамма- или рентгеновского излучения является эффект Комптона [113], в виде

$$\mu(E) = m(E)\rho, \quad (5.4)$$

где  $\rho$  – плотность ослабляющего материала, а  $m(E)$  – массовый коэффициент ослабления (МКО) фотонов с энергией  $E$ . Принято считать, что для большинства ослабляющих веществ МКО практически не зависит от их атомного номера.

Следует заметить, что соотношение (5.4) выполняется не для всех веществ ОК, интересующих потребителей. Дополнительным фактором является то, что в различных участках непрерывного энергетического спектра источника рентгеновского излучения преобладающим видом взаимодействия фотонов с веществом является не эффект Комптона, а сечения других эффектов взаимодействия, существенно образом зависящие от эффективного атомного номера ослабляющего вещества.

В различных реализациях системах сканирующей цифровой радиографии крупногабаритных объектов и досмотровых комплексах применяются источники высокоэнергетического рентгеновского излучения – бетатроны и линейные ускорители электронов [74, 112]. Максимальная энергия рентгеновского излучения у указанных источников превышает 2 МэВ. Очевидно, что в диапазоне максимальных энергий рентгеновского излучения от 2 до 4 МэВ для большинства веществ, кроме тяжелых металлов эффект рождения пар не приводит к заметному смещению  $R_{ij}$ . Незначителен также и фотоэффект. Именно этот диапазон энергий при прочих равных условиях является предпочтительным для измерения массы.

Существенное различие задач, возникающих в досмотровом контроле и контроле промышленных изделий, заключается в степени полноты информации об объекте контроля. Как правило, при контроле промышленных изделий известен материал, из которого они изготовлены. Продемонстрируем для этого случая алгоритм обработки радиографических изображений, позволяющий оценить массу ОК.

## 5.2 Контроль промышленных объектов

Перезапишем выражение (5.3) через интегральные коэффициенты ослабления

$$R_{ij} \approx \mu_{\text{int}}(E_{\text{max}}, H_{ij})H_{ij} \approx m_{\text{int}}(E_{\text{max}}, \rho H_{ij})\rho H_{ij}, \quad (5.5)$$

где  $\mu_{\text{int}}$ ,  $m_{\text{int}}$  – интегральный линейный и интегральный массовый коэффициенты ослабления рентгеновского излучения. Для нас особый интерес представляет вторая часть приближительного равенства. Произведение  $\rho H_{ij}$  на площадь лобовой поверхности  $i$ -го детектора равно массе части объекта, гипотетически вырезаемой соответствующим  $i$ -му детектору телесным углом. Отсюда следует, что масса всего объекта контроля или его фрагмента  $M_F$  оценивается следующим образом

$$M_F = \sum_{(i,j) \in F} V \Delta h_{\theta} \rho H_{ij}, \quad (5.6)$$

здесь  $F$  – проекция всего объекта или его фрагмента на поверхность радиографического изображения,  $h_{\theta}$  – вертикальный размер детектора. Сочетание символов  $\rho H_{ij}$  в выражениях (5.5) и (5.6) будем трактовать, как толщину объекта по линии  $ij$  в  $\text{г/см}^2$ . Иногда толщину объекта в  $\text{г/см}^2$  называют поверхностной плотностью. Будем придерживаться первого определения, так как оно более соответствует анализируемой физической величине. Единственная сложность в оценке массы  $M_F$  связана с необходимостью решения значительного количества уравнений вида

$$G(E_{\text{max}}, \rho H_{ij}) = m_{\text{int}}(E_{\text{max}}, \rho H_{ij})\rho H_{ij} = R_{ij}. \quad (5.7)$$

Неизвестной величиной в нелинейном уравнении (5.7) является параметр  $\rho H_{ij}$ . Для случая полной определенности с атомным номером материала ОК и выбранной заранее максимальной энергии  $E_{\text{max}}$  рентгеновского излучения указанная сложность устраняется на стадии предварительных калибровочных измерений построением высокоточной аппроксимации обратной функции  $G^{-1}(E_{\text{max}}, \rho H)$  в потребительском диапазоне изменения толщины  $\rho H$  контролируемого вещества и для конкретного источника излучения.

### 5.3 Досмотровый контроль

В предыдущих разделах было показано, что на основе сканирования ОК узкими веерными пучками рентгеновского излучения с различными максимальными энергиями  $E_1$  и  $E_2$  ( $E_1 < E_2$ ) можно сформировать два конечных радиографических изображения параметров метода дуальных энергий **A** и **B**. Если использовать обозначения, принятые в формулах (3.4) и (3.5), для пикселя радиографического изображения с координатами  $(i, j)$  можно записать

$$A_{ij} = Z_{ij}(\rho H)_{ij}, \quad B_{ij} = (\rho H)_{ij}, \quad (5.8)$$

где  $(\rho H)_{ij}$ ,  $Z_{ij}$  – соответственно массовая толщина и эффективный атомный номер в соответствующей точке ОК.

Таким образом, изображение **B** дает один из сомножителей в формуле расчёта массы (5.6). Для быстрого расчёта этого радиографического изображения могут быть использованы рассмотренные ранее способы в частности, выражение (3.12), где постоянные коэффициенты аппроксимации определены заранее экспериментальным путём.

Далее для расчёта массы должна быть найдена реальная площадь элементарного объёма ОК перпендикулярная направлению просвечивания, соответствующая пикселю  $(i, j)$  радиографического изображения.

Для определения реального размера соответствующего размера пикселя в вертикальном направлении ( $i$ ) (можно назвать этот размер масштабом пикселя и обозначить его  $d_g$ ) воспользуемся следующими соображениями. Так как источник излучения точечный и имеет место линейное проецирование, то

$$d_g = h_g M, \quad M = \frac{d_o}{d_F}, \quad (5.9)$$

где  $h_g$  – вертикальный шаг детекторной линейки,  $M$  – геометрический фактор,  $d_o$  – расстояние от мишени до проекции средней точки ОК на горизонтальную плоскость через точку фокуса,  $d_F$  – расстояние в

горизонтальной плоскости от фокуса до передней грани детектора, находящегося в этой плоскости.

Следует заметить, что для всех единичных детекторов, находящихся в основной вертикальной части линейки, соотношение (5.9) выполняется, так как их передние грани практически точно выставляются перпендикулярно направлению на фокус. Поэтому числитель и знаменатель геометрического фактора  $M$  для каждого детектора делятся на одну и ту же величину – косинус угла между горизонтальной плоскостью и линией, соединяющей центр передней грани этого детектора и точку фокуса.

Проблема заключается в том, что расстояние  $d_0$ , как правило, неизвестно, и определить его при одноракурсном просвечивании невозможно. Если нет других средств найти его, то логично за размер  $d_0$  взять середину контролируемого транспортного средства или контейнера. Максимальная погрешность, которая может быть связана с этим допущением, будет рассмотрена ниже.

Рассмотрим некоторые способы определения горизонтального масштаба пикселя  $d_x$ . Обычно все программы обработки радиографических изображений в ЦР и досмотровом контроле имеют опцию измерения расстояния между двумя точками изображения в количестве пикселей. Общепринятый подход заключается в том, что вместе с объектом просвечивается эталон с известной длиной, и масштаб пикселя определяется как отношение этой длины к количеству пикселей между концами эталона. Эталон может быть квадратная пластина или рамка, и тогда сразу можно найти вертикальный и горизонтальный масштаб пикселя.

В досмотровом контроле при непрерывном потоке транспортных средств затруднительно использовать отдельные эталоны. В качестве эталона здесь можно использовать длину самой фуры или контейнера. Их длины могут быть заранее известны, а передняя и задняя стенка четко видны на изображении.

Другой способ определения горизонтального масштаба пикселя основан на знании скорости взаимного перемещения ИДК и транспортного средства. Эта скорость точно известна, когда объект неподвижен и вдоль него движется досмотровый комплекс. Такие режимы работы часто используются как в стационарных, так и мобильных ИДК.

При известной скорости  $V$  горизонтальный масштаб пикселя можно рассчитать по формуле

$$d_z = VnT, \quad (5.10)$$

где  $n$  – число импульсов источника излучения, формирующего одну вертикальную строку изображения;  $T$  – период повторения импульсов излучения.

После нахождения вертикального и горизонтального масштабов пикселя изображения расчётная формула для определения массы выделенного оператором ОК или его фрагмента примет вид:

$$M_F = d_g d_z \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} B_{ij}, \quad (5.11)$$

где  $N_i$  – количество вертикальных пикселей в  $j$ -ом столбце выделенного фрагмента изображения,  $N_j$  – общее количество горизонтальных столбцов фрагмента.

Приведённые в разделе 5.3 рассуждения и формулы представляют собой четкий алгоритм определения массы ОК или их фрагментов в ИДК с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий. 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.

Это изображение может дать дополнительную информацию для определения достоверности таможенной декларации.

В заключении этого раздела на конкретном примере рассмотрим максимально-возможную погрешность, связанную с неточным знанием геометрического фактора в формуле (5.9). В качестве примера возьмем

мобильный досмотровый комплекс «Шток-МНК», разработанный Московским технологическим университетом (МИРЭА), в котором используется бетатрон МИБ-9.

В этом комплексе расстояние от фокуса бетатрона до передней грани детекторов по горизонтали равно 6,9 м. Расстояние от стенки транспортного средства, обращенной к детекторам, при сканировании составляет 0,5 м. Ширина транспортного средства практически во всех странах стандартизована и равна 2,55 м. Если считать, что объект или фрагмент, масса которого определяется, очень тонкий и расположен по средней линии транспортного средства, то геометрический фактор равен

$$M_{cp} = \frac{6,9 - 0,5 - \frac{2,55}{2}}{6,9} = 0,743. \text{ Таким же образом можно посчитать, когда}$$

объект или фрагмент находится у стенки, обращенной к детекторам  $M_{det}=0,928$ , обращенной к источнику  $M_{ист}=0,558$ . Если использовать стандартные определения относительной погрешности, то для первого случая она будет 20 %, для второго – 33 %.

На самом деле объекты малых размеров крайне редко перевозят в транспортных средствах, а увеличение размеров быстро уменьшает погрешность, связанную с неопределенностью положения объекта или фрагмента в транспортном средстве или контейнере.

Для стационарных ИДК фокусное расстояние обычно в 1,3..1,5 раза больше, что соответственно снижает указанную выше погрешность. Следует также отметить, что в двухракурсных досмотровых системах имеется принципиальная возможность определить местоположения ОК.

Вторым фактором, определяющим погрешность измерения массы, является ошибка в определении  $\mathbf{V}_{ij}$  (5.10). Этому вопросу было уделено достаточное внимание в предыдущих разделах диссертации.

#### **5.4 Выводы по главе 5**

Предложенные выше алгоритмы обработки одного или двух цифровых радиографических изображений позволяют оценить массы крупногабаритных объектов контроля и их фрагментов как в случае наличия предварительной 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/см<sup>2</sup> 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.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Jones, T.S. Evaluation of digital X-radiological imaging systems for US Air Force applications // *Materials evaluation*. – 2001. – Vol. 59. – Issue 8. – Pp. 971–975.
2. Berger, H., Schulte, R.L. Volumetric X-ray testing // *Materials Evaluation*. – 2002. – Vol. 60. – Issue 9. – Pp. 1028–031.
3. Удод, В.А., Ван, Я., Осипов, С.П., Чахлов, С.В., Усачёв, Е.Ю., Лебедев, М.Б., Темник, А.К. Современное состояние и перспективы развития систем цифровой рентгенографии для дефектоскопии, диагностики и досмотрового контроля объектов // *Дефектоскопия*. – 2016. – № 9. – С. 11–28.
4. Приказ ФТС России от 24.01.2005 № 52 «Об утверждении Концепции создания системы таможенного контроля крупногабаритных грузов и транспортных средств».
5. Приказ ФТС России от 07.02.2008 № 113 «Об утверждении Комплексного плана мероприятий по вводу в эксплуатацию и использованию инспекционно-досмотровых комплексов (ИДК) при таможенном контроле товаров и транспортных средств в пунктах пропуска через государственную границу Российской Федерации».
6. Приказ ФТС России от 14.04.2009 № 672 «Об утверждении Типового положения об отделе применения инспекционно-досмотровых комплексов».
7. Попов, О.Р., Шевцов, А.В. Мобильные инспекционно-досмотровые комплексы–возможности, технологические особенности, перспективы развития // *Вестник Российской таможенной академии*. – 2008. – № 4. – С. 52–58.
8. Улупов, Ю.Г., Мячин, Д.А., Черных, В.А. Инспекционно-досмотровые комплексы: новые возможности таможенной службы России // *Ученые записки имени В.Б. Бобкова филиала Российской Таможенной Академии*. – 2007. – № 3. – С. 4–60.

9. Барышникова, Е.Ю. Факторы эффективности в управлении таможенным делом // Транспортное дело России. – 2009. – № 3. – С. 90–92.
10. Кныш, С.В., Мамаевский, Р.В. Проблемы и пути их решения на основе применения Инспекционно-досмотрового комплекса (ИДК) в таможенных органах РФ // Научный альманах. – 2015. – № 12–1. – С. 197–201.
11. Vinogradov, S., Arodzero, A., Lanza, R. C. Performance of X-ray detectors with SiPM readout in cargo accelerator-based inspection systems // Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2013 IEEE. – 2013. – Pp. 1–6.
12. Hudson, L. et al. Measurements and standards for bulk-explosives detection // Applied radiation and isotopes. – 2012. – Vol. 70. – Issue 7. – Pp. 1037–1041.
13. Akery, A. Cargo inspection system: pat. USA 8837670. – 2014.
14. Malyshev V.P. et al. The IDK-6/9 MeV linear electron accelerator and its application in the customs inspection system // Contributions to the Proc. 23rd Russ. Part. Accel. Conf.–RuPAC 2012. – 2012. – Pp. 549–550.
15. Kolkoori, S., Wrobel, N., Hohendorf, S., Ewert, U. High energy X-ray imaging technology for the detection of dangerous materials in air freight containers // Technologies for Homeland Security (HST), 2015 IEEE International Symposium on. – IEEE. – 2015. – Pp. 1–6.
16. Jaccard, N., Rogers, T.W., Morton, E.J., Griffin, L.D. Automated x-ray image analysis for cargo security: critical review and future promise // Journal of X-ray science and technology. – 2017. – Vol. 25. – Issue 1. – Pp. 33–56.
17. Cho, Y.H., Kang, B.S. Analysis of the photoneutron activation effects generated by 9 MeV X-ray in a container cargo inspection facility // Radiation protection dosimetry. – 2010. – Vol. 1. – Pp. 1–8.
18. Алимов, А.С. Практическое применение электронных ускорителей.–М.: Препринт НИИЯФ МГУ. – 2011.– 41 с.

19. Chakhlov, S.V., Kasyanov, S.V., Kasyanov, V.A., Osipov, S.P., Stein, M.M., Stein, A.M., Xiaoming, S. Betatron application in mobile and relocatable inspection systems for freight transport control // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 671. – Article number 012024. – 5 p.

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

21. Chen, G., Turner, J., Nisius, D., Holt, K., Brooks, A. Linatron Mi6, the X-ray source for cargo inspection // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 66. – Pp. 68–74.

22. Pincus, C., Chinn, D., Martz, H., Rodriguez, J., Thompson, R. Technical advice and support for the cargo advanced automated radiography system (CAARS) Program Task 2.2 Transmission Digital Radiography (DR). – Lawrence Livermore National Laboratory. – 2011. – 38 p.

23. Ogorodnikov, S., Arlychev, M., Shevelev, I., Apevalov, R., Rodionov, A., Polevchenko, I. Material discrimination technology for cargo inspection with pulse-to-pulse linear electron accelerator // *Proceedings of IPAC2013. Shanghai*. – 2013. – Pp. 3699–3701.

24. Singh, S., Singh, M. Explosives detection systems (EDS) for aviation security // *Signal Processing*. – 2003. – Vol. 83. – Issue 1. – Pp. 31–55.

25. Tang, C., Chen, H., Liu, Y. Electron Linacs for cargo inspection and other industrial applications // *Power*. – 2009. – Vol. 10. – no. SM/EB-28. – 8 Pp.

26. Zavadtsev, A.A. et al. A dual-energy linac cargo inspection system // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2011. – Vol. 54. – Issue 2. – Pp. 241–248.

27. O'Day, B.E., Hartwig, Z.S., Lanza, R.C., Danagoulian, A. Initial results from a multiple monoenergetic gamma radiography system for nuclear security // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2016. – Vol. 832. – Pp. 68–76.

28. Xing, Y., Zhang, L., Duan, X., Cheng, J., Chen, Z. A reconstruction method for dual high-energy CT with MeV x-rays // *IEEE Transactions on Nuclear science.* – 2011. – Vol. 58. – Issue 2. – Pp. 537–546.

29. Li, L., Li, R., Zhang, S., Zhao, T., Chen, Z. A dynamic material discrimination algorithm for dual MV energy X-ray digital radiography // *Applied Radiation and Isotopes.* – 2016. – Vol. 114. – Pp. 188–195.

30. Рыжиков, В. Д. и др. Трехэнергетическая цифровая радиография для разделения веществ с малым эффективным атомным номером // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електроенергетика і перетворююча техніка.* – 2013. – № 34. – С. 43–51.

31. Sotiropoulou, P. et al. Polynomial dual energy inverse functions for bone Calcium/Phosphorus ratio determination and experimental evaluation // *Applied Radiation and Isotopes.* – 2016. – Vol. 118. – Pp. 18–24.

32. Ghorbani, Y. et al. Use of X-ray computed tomography to investigate crack distribution and mineral dissemination in sphalerite ore particles // *Minerals Engineering.* – 2011. – Vol. 24. – Issue 12. – Pp. 1249–1257.

33. Lee, J., Lee, Y., Cho, S., Lee, B.C. A dual-energy material decomposition method for high-energy X-ray cargo inspection // *Journal of the Korean Physical Society.* – 2012. – Vol. 61. – Issue 5. – Pp. 821–824.

34. Fu, K. Performance enhancement approaches for a dual energy X-ray. – Diss. PhD. – San Diego: UC. – 2010. – 202 p – URL: <https://escholarship.org/uc/item/43k2z7r3.pdf>

35. Brandis M. Development of a gamma-ray detector for Z-selective radiographic imaging. – Diss. PhD – Hebrew University of Jerusalem, The Racah Institute of physics. – 2013. – 168 Pp.

36. Manohara, S.R., Hanagodimath, S.M., Thind, K.S., Gerward, L. On the effective atomic number and electron density: a comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* – 2008. – Vol. 266. – Issue 18. – Pp. 3906–3912.

37. Hubbell, J.H. Review of photon interaction cross section data in the medical and biological context // *Physics in medicine and biology*. – 1999. – Vol. 44. – Issue 1. – Pp. R1–R22.

38. Sowerby, B.D., Watt, J.S. Development of nuclear techniques for on-line analysis in the coal industry // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 1990. – Vol. 299. – Issue 1–3. – Pp. 642–647.

39. Fainberg, A. Explosives detection for aviation security // *Science*. – 1992. – Vol. 255. – Issue 5051. – Pp. 1531–1537.

40. Udod, V., Van, J., Osipov, S., Chakhlov, S., Temnik, A. State of the art and development trends of the digital radiography systems for cargo inspection // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 671. – Article number 012059. – 5 p.

41. Evans, J.P.O. Stereoscopic imaging using folded linear dual-energy X-ray detectors // *Measurement Science and Technology*. – 2002. – Vol. 13. – Issue 9. – Pp. 1388–1397.

42. Bjorkholm, P.J. Material discrimination using single-energy X-ray imaging system: пат. 6069936 США. – 2000.

43. Недавний, О.И., Сидуленко, О.А., Осипов, С.П. Вычислительные аспекты двухэнергетической цифровой рентгенографии // *Дефектоскопия*. – 2002. – № 3. – С. 24–30.

44. Штейн, А.М. Применение частотно-импульсных рентгеновских аппаратов для реализации режима дуальной энергии // *Контроль. Диагностика*. 2013. – № 33. – С. 117–122.

45. Сидуленко, О.А., Касьянов, В.А., Касьянов, С.В., Осипов, С.П. Исследование возможности применения малогабаритных бетатронов для идентификации веществ объектов контроля методом дуальных энергий // *Контроль. Диагностика*. – 2008. – № 8. – С. 46–52.

46. Chen, G. Understanding X-ray cargo imaging // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2005. – Vol. 241. – Issue 1. – C. 810–815.

47. Eberhardt, J.E. et al. Fast neutron radiography scanner for the detection of contraband in air cargo containers // Applied Radiation and Isotopes. – 2005. – Vol. 63. – Issue 2. – Pp. 179–188.

48. Saverskiy, A.Y., Dinca, D.C., Rommel, J.M. Cargo and container X-ray inspection with intra-pulse multi-energy method for material discrimination // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 66. – Pp. 232–241.

49. Gil, Y., Oh Y., Cho, M., Namkung, W. Radiography simulation on single-shot dual-spectrum X-ray for cargo inspection system // Applied Radiation and Isotopes. – 2011. – Vol. 69. – Issue 2. – Pp. 389–393.

50. Fantidis, J.G., Nicolaou, G.E. A transportable fast neutron and dual gamma-ray system for the detection of illicit materials // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2011. – Vol. 648. – Issue 1. – Pp. 275–284.

51. Osipov, S.P., Chakhlov, S.V., Osipov, O.S., Shtein, A.M., Strugovtsev, D.V. About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81. – Article number 012082. – 13 p.

52. Kolkoori, S, Wrobel, N, Osterloh, K, Redmer, B, Deresch, A, Ewert, U. High-energy radiography for detecting details in highly complex packings // Materials testing. – 2013. – Vol. 55. – Issue 9. – Pp. 683–688.

53. Mery, D. Computer vision technology for X-ray testing // Insight-non-destructive testing and condition monitoring. – 2014. – Vol. 56. – Issue 3. – Pp. 147–155.

54. Martins, M.N., Silva, T.F. Electron accelerators: history, applications, and perspectives // Radiation physics and chemistry. – 2014. – Vol. 95. – Pp. 78–85.



55. Ryzhikov, V.D., Opolonin, O.D., Lysetska, O.K., Galkin, S.M., Voronkin, Y.F., Perevertaylo, V.L. Research on improvement of receiving-detecting circuit for digital radiographic systems with advanced spatial resolution // *Nondestructive testing of materials and structures*. – Springer Netherlands. – 2013. – Vol. 6. – Pp. 105–109.

56. Martin, L., Tuysuzoglu, A., Karl, W. C., Ishwar, P. Learning-based object identification and segmentation using dual-energy CT images for security // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2015. – Vol. 24. – Issue 11. – Pp. 4069–4081.

57. Rebuffel, V., Dinten, J.M. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limit // *Insight-non-destructive testing and condition monitoring*. – 2007. – Vol. 49. – Issue 10. – Pp. 589–594.

58. Beldjoudi, G., Rebuffel, V., Verger, L., Kaftandjian, V., Rinkel, J. An optimised method for material identification using a photon counting detector // *Nuclear instruments and methods in physics research. Section A: accelerators, Spectrometers, detectors and associated equipment*. – 2012. – Vol. 663. – Issue 1. – Pp. 26–36.

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

60. Park, J.S. Kim J.K. Calculation of effective atomic number and normal density using a source weighting method in a dual energy X-ray inspection system // *Journal of the korean physical society*. – 2011. – Vol. 59. – Issue 4. – Pp. 2709–2713.

61. Klimenov, V.A., Osipov, S.P., Temnik, A.K. Identification of the substance of a test object using the dual-energy method // *Russian journal of nondestructive testing*. – 2013. – Vol. 49. – Issue 11. – Pp. 642–649.

62. Osipov, S.P., Temnik, A.K., Chakhlov, S.V. The effects of physical factors on the quality of the dual high energy identification of the material of an

inspected object // Russian journal of nondestructive esting. – 2014. – Vol. 50. – Issue 8. – Pp. 491–498.

63. Ананьев, Л.М., Штейн, М.М. К вопросу математического описания бетатрона // Известия Томского политехнического института. – 1971. – Т. 180. – С. 3–7.

64. Завьялкин, Ф.М., Осипов, С.П. Зависимость среднего значения и флуктуаций поглощенной энергии от размеров сцинтиллятора // Атомная энергия. – 1985. – Т. 59. – № 4. – С. 281–283.

65. Завьялкин, Ф.М., Осипов, С.П. Влияние нестабильности параметров пучка тормозного излучения на точность радиометрических измерений // Дефектоскопия. – 1988. – № 2. – С. 36–40.

66. Lakshminarayana, V., Jnanananda, S. Scattering cross sections of gamma radiation // Proceedings of the Physical Society. – 1961. – Vol. 77. – Issue 3. – Pp. 593–598.

67. Gamma data for elements – URL: <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/groupkon.php>.

68. Chadwick, M.B. et all. ENDF/B–VII. 0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology // Nuclear data sheets. – 2006. – Vol. 107. – Issue 12. – Pp. 2931–3060.

69. Schiff, L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // Physical review. – 1951. – Vol. 83.– Issue 2. – Pp. 252–253.

70. Aliev, F.K., Alimov, G.R., Muminov, A.T., Osmanov, B.S., Skvortsov, V.V. Simulation of experiment on total external reflection of electron bremsstrahlung // Technical physics. – 2005. – Vol. 50. – Issue 8. – Pp. 1053–1057.

71. Mordasov, N.G., Ivashchenko, D.M., Chlenov, A.M., Astakhov, A.A. Simulation of methods for a rapid determination of the energy spectrum of bremsstrahlung from electron accelerators // Technical physics. – 2004. – Vol. 49. – Issue 9. – Pp. 1213–1220.

72. Ali, E.S.M., Rogers, D.W.O. Functional forms for photon spectra of clinical linacs // *Physics in medicine and biology*. – 2011. – Vol. 57. – Pp. 31–50.

73. Runkle, R.C., White, T.A., Miller, E.A., Caggiano, J.A., Collins, B.A. Photon and neutron interrogation techniques for chemical explosives detection in air cargo: A critical review // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2009. – Vol. 603. – Issue 3. – Pp. 510–528.

74. Reed, W.A. Nondestructive testing and inspection using electron linacs // *Industrial Accelerators and Their Applications*. Edited by Hamm R.W., Hamm M.E. Singapore: Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. . – 2012. – Pp. 307–369.

75. Fuchs, T., Keßling, P., Firsching, M., Nachtrab, F., Scholz, G. Industrial Applications of Dual X-ray Energy Computed Tomography (2X-CT). Non-destructive Testing of Materials and Structures. Springer Netherlands. – 2013. – Vol. 6. – Pp. 97–103.

76. Osipov, S., Chakhlov, S., Osipov, O., Shtein, A., Van, J. Adequacy criteria of models of the cargo inspection system with material discrimination option // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 671. – Article number 012010. – 6 p.

77. Vinegar, H.J., Wellington, S.L. Tomographic imaging of three-phase flow experiments // *Review of Scientific Instruments*. – 1987. – Vol. 58. – Issue 1. – Pp. 96–107.

78. Alvarez, R.E., Macovsky, A. Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography // *Phys. Med. Biol.* – 1976. – Vol. 21. – Pp. 733–744.

79. Alvarez, R., Seppi, E.A. A comparison of noise and dose in conventional and energy selective computed tomography // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1979. – Vol. 26. – Pp. 2853–2856.

80. Krumm, M, Kasperl, S., Franz, M. Reducing non-linear artifacts of multi-material objects in industrial 3D computed tomography // *NDT & E International*. – 2008. – Vol. 41. – Pp. 242–251.

81. Lehmann, L.A., Alvarez, R.E., Macovski, A., Brody, W.R., Pelc, N.J., Riederer, S.J., Hall, A.L. Generalized image combinations in dual KVP digital radiography // *Med. Phys.* – 1981. – Vol. 8. – Pp. 659–667.
82. Kalender, W.A., Perman, W.H., Vetter, J.R., Klotz, E. Evaluation of a prototype dual energy computed tomographic apparatus. I. Phantom studies // *Med. Phys.* – 1986. – Vol. 13. – Pp. 334–339.
83. Ying, Z., Naidu, R., Crawford, C.R. Dual energy computed tomography for explosive detection // *Journal of X-ray Science and Technology.* – 2006. – Vol. 14. – Pp. 235–256.
84. Wells, K., Bradley, D.A. A review of X-ray explosives detection techniques for checked baggage // *Appl. Radiat. Isot.* – 2012. – Vol. 70. – Pp. 1729–1746.
85. Creagh, D. Radiation-based techniques for use in the border protection context // *Radiat. Phys. Chem.* – 2014. – Vol. 95. – Pp. 50–58.
86. Jaccard, N., Rogers, T.W., Morton, E.J., Griffin, L.D. Tackling the X-ray cargo inspection challenge using machine learning // *SPIE Defense+ Security.* – International Society for Optics and Photonics. – 2016. – Article number 98470N. – Pp. 1–13.
87. Buffler, A., Tickner, J. Detecting contraband using neutrons: challenges and future directions // *Radiation Measurements.* – 2010. – Vol. 45. – Issue 10. – Pp. 1186–1192.
88. Ogorodnikov, S., Petrunin, V. Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs systems for material recognition // *Phys. Rev. Spec. Top. – Accel. Beams.* – 2002. – Vol. 5. – Pp. 104701.1–104701.12.
89. Osipov, S.P., Libin, E.E., Chakhlov, S.V., Osipov, O.S., Shtein, A.M. Parameter identification method for dual-energy X-ray imaging // *NDT & E International.* – 2015. – Vol. 76. – Pp. 38–42.
90. Siegbahn, K. (ed.). *Alpha-, beta- and gamma-ray spectroscopy.* Burlington, MA: Elsevier. – 2012. – 915 p.

91. Torres, D.F. Theoretical modeling of the diffuse emission of gamma rays from extreme regions of star formation: the case of Arp 220 // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 617. – Pp. 966–986.

92. Van Grieken, R., Markowicz, A.A. (Eds.) *Handbook of X-Ray Spectrometry: 2nd edition, Revised and Expanded.* – New York, Basel: Marcel Dekker, 2002. – 985 p.

93. Zaidi, H. Relevance of accurate Monte Carlo modeling in nuclear medical imaging // *Med. Phys.* – 1999. – Vol. 26. – Pp. 574–608.

94. Nedavnii, O.I., Osipov, S.P. Approximation of the relationships of the integral and differential attenuation factors of continuous X-rays (bremsstrahlung) to the absorbing filter thickness // *Russ. J. Nondestr. Test.* – 1994. – Vol. 30. – Pp. 716–719.

95. Zentai, G. X-ray imaging for homeland security // *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering.* – 2010. – Vol. 3. – Pp.13–20.

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

97. Abashkin, A., Osipov, S., Chakhlov, S., Shteyn, A. Experimental research of high energy capabilities of material recognition by dual-energy method for the low-dose radiation // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* – 2015. – 2016. – Vol. 132. – Article number 012012. – 6 p.

98. Kolkoori, S, Wrobel, N, Deresch, A, Redmer, B, Ewert, U. Dual high-energy X-ray digital radiography for material discrimination in cargo containers // 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6–10, 2014, Prague. Czech Republic. – URL: [www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/149\\_Kolkoori\\_Rev1.pdf](http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/149_Kolkoori_Rev1.pdf).

99. Огородников, С.А., Симочко, С.В., Малышенко, Ю.В. Инспекционно-досмотровый комплекс СТ-6035 // *Таможенная политика России на Дальнем Востоке.* – 2014. – № 1(66). – С. 70–82.

100. Michel, S., Mendes, M., de Ruiter, J.C., Koomen, G.C., Schwaninger, A. Increasing X-ray image interpretation competency of cargo security screeners // *International Journal of Industrial Ergonomics*. – 2014. – Vol. 44. – Issue 4. – Pp. 551–560.
101. Tuszynski, J., Briggs, J.T., Kaufhold, J. A method for automatic manifest verification of container cargo using radiography images // *Journal of Transportation Security*. – 2013. – Vol. 6. – Issue 4. – P. 339–356.
102. Mery, D., Rizzo, V., Zuccar, I., Pieringer, C. Automated X-ray object recognition using an efficient search algorithm in multiple views // *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2013 IEEE Conference on*. – IEEE. – 2013. – Pp. 368–374.
103. Uroukov, I., Speller, R. A preliminary approach to intelligent x-ray imaging for baggage inspection at airports // *Signal Processing Research*. – 2015. – Vol. 4. – Pp. 1–11.
104. Turcsany, D., Mouton, A., Breckon, T.P. Improving feature-based object recognition for X-ray baggage security screening using primed visual words // *Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on*. – IEEE. – 2013. – Pp. 1140–1145.
105. Thiesan, L., Hannum, D., Murray, D.W., Parmeter, J.E. Survey of commercially available explosives detection technologies and equipment 2004 // *Report for NIJ grant 96-MU-MU-K011*. – 2004. – 97 p.
106. Pourtaghi, G., Valipour, F., Nourian, S., Mofidi, A. Ambient x-ray pollution assessment at inspection gates of airports-a case study of Mehrabad and Imam Khomeini Airports in Iran // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 12. – Issue 1. – Pp. 1–6.
107. Vassiliades, V. Application of signal detection theory to the recognition of objects in colour-encoded x-ray images: Diss. – Nottingham Trent University. – 2010. – 204 p.

108. Чахлов, С.В., Осипов, С.П. Распознавание материалов методом дуальных энергий (Dual) // Программа для ЭВМ RU № 2015615107, опубликовано 20.06.2015.

109. Gläser, M., Thämmel, H-W. DDR Patent 3311626. – 1991.

110. Grodzins, L. USA Patent 6192101. – 2001.

111. Berry, P.C., Summa, D.A., Vansyoc, K.G. The future NDE radiography department, Conference proceedings of IV pan American conference for NDT, Buenos Aires. –2007. – P. 1 –10.

112. Baciù, I.L. Advanced methods for product control and process monitoring, Diss. Università degli Studi di Napoli Federico II. – 2007.

113. Lightman, A.P., Zdziarski, A.A. Pair production and Compton scattering in compact sources and comparison to observations of active galactic nuclei // The Astrophysical Journal. – 1987. –Vol. 319. – Pp. 643–661.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт внедрения в учебный процесс

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



«ТВЕРЖДАЮ»  
Директор ИНК ТПУ

В.Н. Бориков /  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

#### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

«15» октября 2017 № 3  
г. Томск

Проверка использования результатов кандидатской диссертации  
Штейна Александра Михайловича

Об использовании результатов диссертационной работы «Распознавание материалов методом дуальных энергий в досмотровых комплексах с бетатронными источниками излучения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в учебной и научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Составлен комиссией:

Председатель – зав. каф. ФМПК ИНК, А.П. Суржиков

Члены комиссии: профессор каф. ФМПК ИНК, А.Е. Гольдштейн  
доцент каф. ФМПК ИНК, Б.Б. Мойзес

С 02.10.2017 по 03.10.2017 комиссия провела проверку и подтверждает, что научные исследования Штейна А.М., отраженные в диссертационной работе «Распознавание материалов методом дуальных энергий в досмотровых комплексах с бетатронными источниками излучения», были рассмотрены, одобрены и приняты к использованию в учебном процессе и при выполнении НИРС и ВКР студентами ИНК ТПУ, в частности, рекомендованы для внедрения:

1. В дисциплины «Методы неразрушающего контроля», «Радиационный контроль и диагностика» кафедры «ФМПК» ТПУ.
2. Разработанный уникальный стенд с программным обеспечением, основанные на физическом принципе метода дуальных энергий

Председатель комиссии

А.П. Суржиков

Члены комиссии

А.Е. Гольдштейн

Б.Б. Мойзес



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт внедрения в производственный процесс



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский технологический университет»  
**МИРЭА**

просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119454  
тел.: (499) 215 65 65 доб. 1140, факс: (495) 434 92 87  
e-mail: mirea@mirea.ru, http://www.mirea.ru

05.10.2017 № ВС-214/79

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



«Утверждаю»

Первый проректор МИРЭА

В.В. Соколов

АКТ

Об использовании результатов научных исследований сотрудника  
Национального исследовательского Томского политехнического  
университета Штейна А.М. в Московском технологическом университете

Разработанные методики распознавания материалов методом дуальных энергий были успешно применены при разработке опытных образцов досмотровых комплексов, изготовленных Московским технологическим университетом. Разработанный математический аппарат позволил уточнить важные параметры радиометрического тракта при его проектировании.

Заместитель директора ИНПЦ «СНК»

М.Б. Лебедев