

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт – Неразрушающего контроля  
Направление подготовки – 12.04.01. «Приборостроение»  
Кафедра – Физических методов и приборов контроля качества

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСПЕКЦИОННОГО ДОСМОТРОВОГО КОМПЛЕКСА С ФУНКЦИЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ</b>

УДК 620.179.152:656.073.51

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Струговцов Дмитрий Владиславович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
в.н.с. лаб. №40 ИНК ТПУ	Осипов Сергей Павлович	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой менеджмента	Чистякова Наталья Олеговна	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Юлия Владимировна	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Физические методы и приборы контроля качества	Суржиков Анатолий Петрович	д. физ.–мат. наук, профессор		

Томск – 2016 г.

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P1	<b>Способность</b> совершенствовать и повышать свой интеллектуальный и общекультурный уровень и специальные знания в области математических, естественных, гуманитарных и экономических наук в комплексной инженерной деятельности на основе целостной системы научных знаний об окружающем мире;	Требования ФГОС (ОК-1, Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	<b>Способность</b> адаптироваться к новым ситуациям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности в понимании сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения коммуникативных задач современных технических средств и информационных технологий в профессиональной области.	Требования ФГОС (ОК-7, Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	<b>Способность</b> использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом; эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды, демонстрируя навыки руководства отдельными группами исполнителей; в том числе над междисциплинарными проектами, уметь проявлять личную ответственность, приверженность профессиональной этике и нормам ведения профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-4,50 Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	<b>Способность</b> к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; разрабатывать самостоятельно техническую документацию; четко излагать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности в областях контроля качества продукции предприятий измерительной техники и точного приборостроения; приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности умения непосредственно не связанных со сферой деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2,ОК—6,ОК-3) Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	<b>Умение</b> использовать основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, основы теоретического и экспериментального исследования в комплексной инженерной деятельности при разработке средств измерения и контроля, используя	Требования ФГОС (ПК-1,ПК-10), Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
	стандартные пакеты и средства автоматизированного проектирования в приборостроении.	<i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
Р6	<b>Умение</b> профессионально эксплуатировать современное оборудование и приборы в соответствии с целями магистерской программы, организовывать технологическую подготовку производства приборных систем различного назначения и принципа действия, разрабатывать и внедрять новые технологические процессы с использованием гибких САПР и оценивать их экономическую эффективность и инновационные риски при их внедрении.	Требования ФГОС (ПК-15, ПК-4, ПК-17), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
Р7	<b>Способность</b> проектировать приборные системы и технологические процессы с использованием средств САПР и опыта разработки конкурентоспособных изделий; осуществлять проектную деятельность в профессиональной сфере на основе системного подхода.	Требования ФГОС (ПК-10, ПК-7), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
Р8	<b>Умение</b> разрабатывать методики проведения теоретических и экспериментальных исследований по анализу, синтезу и оптимизации методов измерения контроля и диагностики, используемых в приборостроении; способность разработать и проводить оптимизацию натуральных экспериментальных исследований приборных систем с учётом критериев надёжности; использовать результаты научно-исследовательской деятельности и пользоваться правами на объекты интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ПК-16, ПК-23, ПК-25) ПК-2, 26, 27, 28), Критерий 5 АИОР (п.2.3, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
Р9	<b>Умение</b> организовывать современное метрологическое обеспечение технологических процессов производства приборных систем и разрабатывать новые методы контроля качества выпускаемой продукции и технологических процессов; решать экономические и организационные задачи технологической подготовки приборных систем и выбирать системы обеспечения экологической безопасности в производстве и при технологическом контроле.	Требования ФГОС (ПК-18; ПК-19) Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
Р10	<b>Способность</b> проектировать математические модели анализа и оптимизации объектов исследования, выбирать численные методы их моделирования или разработать новый алгоритм решения задачи; выбирать оптимальные методы и программы экспериментальных исследований и испытаний, проводить измерения с выбором современных технических средств и обработкой результатов измерений.	Требования ФГОС (ПК-10; ПК-21, ПК-22) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
 образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Неразрушающего контроля  
 Направление подготовки (специальность) – Приборостроение  
 Кафедра – Физических методов и приборов контроля качества

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)                      (Дата)                      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации <small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small>
---

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4А	Струговцову Дмитрию Владиславовичу

Тема работы:

«Совершенствование высокоэнергетического инспекционного комплекса с функцией идентификации веществ объектов контроля»	
Утверждена приказом директора	от 21.03.2014 №1640/с
Срок сдачи студентом выполненной работы	

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т.д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияние на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т.д )</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Объектом исследования являются высокоэнергетические инспекционные досмотровые комплексы с функцией идентификации веществ объектов контроля;</li> <li>2. Экспериментальный досмотровый комплекс РКНЛ РКД ИНК ТПУ с известными характеристиками;</li> <li>3. Алгоритмы формирования конечных радиографических изображений;</li> <li>4. Алгоритмы идентификации веществ объекта контроля</li> <li>5. Программа для обработки радиографических изображений «Диада» и «Dual»</li> </ol>
--	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аналитический обзор основных публикаций посвященных методу дуальных энергий и инспекционным досмотровым комплексам с функцией идентификации веществ объекта контроля;</li> <li>2. Разработать математическую модель инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ объектов контроля;</li> <li>3. Разработать алгоритм оценки производительности инспекционного досмотрового комплекса;</li> <li>4. Разработать алгоритм для реализации неявного способа линий уровней для определения параметров метода дуальных энергий;</li> <li>5. Провести цикл экспериментальных исследований по оценке работоспособности предлагаемого алгоритма.</li> <li>6. Проанализировать существующих конструктивных, физических и программных возможностей инспекционных досмотровых комплексов;</li> </ol>
---	---

<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
---	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
По менеджменту	Н.О. Чистякова
По социальной ответственности	Ю.В. Анищенко
По английскому языку	А.К. Устюжанина

**Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Алгоритм оценки погрешности параметров ИДК	А.К. Устюжанина
--	-----------------

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
в.н.с. лаб. №40 ИНК ТПУ	С.П. Осипов	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Д.В. Струговцов		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b> 1БМ4А	<b>ФИО</b> Струговцову Дмитрию Владиславовичу
------------------------	--

<b>Институт</b>	Неразрушающего контроля	<b>Кафедра</b>	ФМПК
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Приборостроение

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Исходная информация для данного раздела взята в научных публикациях, аналитических материалах, нормативно-технических документах, используя следующие методы исследования: анализ процесса проведения досмотрового контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ, экономический прогноз использования подобных комплексов
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Потенциальные потребители результатов исследования, анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, SWOT-анализ
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Инициация проекта, организационная структура
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Планирование управления научно-техническим проектом, построение диаграммы Ганта, бюджет научно-технического исследования (НТИ) проектная организационная структура научного исследования, реестр рисков проекта
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Расчета интегрального показателя эффективности научного исследования.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. <i>«Портрет» потребителя результатов НТИ</i>
2. <i>Сегментирование рынка</i>
3. <i>Диаграмма Ганта</i>
4. <i>Матрица SWOT</i>
5. <i>Проектная структура научного исследования</i>
6. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>
7. <i>Потенциальные риски</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Заведующий кафедрой менеджмента	Н.О. Чистякова	к.э.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1БМ4А	Д.В. Струговцов		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1БМ4А	Струговцову Дмитрию Владиславовичу

<b>Институт</b>	Неразрушающего контроля	<b>Кафедра</b>	ФМПК
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Приборостроение

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Совершенствование инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ предназначенного для проведения досмотрового контроля крупногабаритных грузов и машин. Область применения – таможенный контроль
---	--

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</li> </ul>	<p><b>Производственная безопасность:</b></p> <p>1.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– отклонение показателей микроклимата от нормальных</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны</li> <li>– повышенный уровень ионизирующего излучения</li> <li>– повышенный уровень электромагнитных излучений</li> <li>– перенапряжение анализаторов (зрение)</li> </ul> <p>1.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– электрический ток</li> </ul>
<p><b>2. Экологическая безопасность</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны;</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу</li> </ul>	<p><b>Экологическая безопасность</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> </ul>

(выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	<b>Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> – пожар
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	<b>Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Ю.В. Анищенко	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Д.В. Струговцов		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 146 страниц, 19 рисунков, 35 таблиц, 50 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: ИНСПЕКЦИОННЫЙ ДОСМОТРОВЫЙ КОМПЛЕКС (ИДК), ЦИФРОВАЯ РАДИОГРАФИЯ, БЕТАТРОН, МЕТОД ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ (МДЭ), МАССОВАЯ ТОЛЩИНА, ЭФФЕКТИВНЫЙ АТОМНЫЙ НОМЕР

Объектом диссертационных исследований являются высокоэнергетические ИДК. Предметом исследований являются способы модификации и улучшения высокоэнергетических ИДК с функцией идентификации веществ объектов контроля

Цель исследований – выбор и оценка оптимальных параметров и характеристик высокоэнергетического ИДК с функцией идентификации веществ объектов контроля.

В процессе исследования проводилось:

- ознакомление с физикой МДЭ;
- анализ существующих технических реализаций ИДК;
- разработка альтернативных вариантов реализации;
- разработка алгоритмов оценки и выбора оптимальных параметров и характеристик высокоэнергетического ИДК;
- изучение алгоритмов формирования и обработки изображения;

В результате исследований рассмотрены основные технические и программные улучшения ИДК, которые позволят повысить надежность существующих досмотровых систем.

Результаты исследований могут быть переданы в таможенные службы, а также производителям ИДК для дальнейшей доработки и внедрения в существующие системы досмотрового контроля.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 7.0 и представлена на CD–диске (в конверте на обороте обложки).

## Определения и обозначения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**детектор ионизирующего излучения:** Чувствительный элемент средства измерений, предназначенный для преобразования энергии ионизирующего излучения в другой вид энергии, удобный для регистрации и (или) измерения одной или нескольких величин, характеризующих воздействующее на детектор излучение.

**идентификация вещества:** Отнесение вещества к одному из трех основных категорий материалов (органические вещества, металлы и сплавы, промежуточные материалы и легкие металлы и сплавы)

**инспекционно–досмотровый комплекс:** Техническое средство таможенного контроля, использующее проникающее ионизирующее излучение для получения изображения и анализа содержимого крупногабаритных грузов и транспортных систем.

**контрастность изображения (контрастная чувствительность) ИДК:** Показатель, характеризующий разность оттенков, которую может различать система.

**массовая толщина поглотителя:** Величина равная произведению плотности вещества на толщину объекта в направлении просвечивания.

**метод дуальных энергий:** Высокоэнергетический метод основанный на формировании двух цифровых рентгеновских изображений, полученных для двух, специальным образом подобранных, максимальных энергий рентгеновского излучения, и последующей их обработке с одновременным получением информации о плотности и эффективном атомном номере материала объекта испытаний.

**нерезкость изображения:** Половина ширины размытости перехода от одного уровня оптической плотности к другой, выраженной в миллиметрах.

**предел разрешения:** Наименьшее линейное или угловое расстояние между двумя объектами, начиная с которого их изображения сливаются.

**проникающая способность ИДК:** Показатель, характеризующий максимальную толщину препятствия, за которым на получаемом изображении можно увидеть наличие некоторого «эталонного» предмета.

**расстояние от источника излучения до контролируемого объекта:** Интервал между источником излучения и объектом контроля в направлении оси рабочего пучка излучения.

**чувствительность ИДК:** Показатель, который определяется как диаметр специального тест-объекта в виде вольфрамовой проволоочки, уверенно обнаруживаемой на дисплеи монитора за экраном из стали определенной толщины.

**эффективный атомный номер вещества:** Отношение усредненного значения произведения атомного номера и массовой доли химического элемента, входящего в состав вещества, к усредненному значению массовой доли химического элемента, входящего в состав вещества.

**яркость изображения:** Отношение силы света элемента излучающей поверхности к площади проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения.

В данной работе применены сокращения:

ИДК – инспекционный досмотровый комплекс;

МДЭ – метод дуальных энергий;

ЦР – цифровая радиография;

ОК – объект контроля.

## Оглавление

Введение	7
1. Обзор литературы	12
2. Инспекционные досмотровые комплексы с функцией идентификации веществ	21
3. Совершенствование и модернизация инспекционных досмотровых комплексов	31
3.1 Алгоритмы выбора и оценки параметров инспекционных досмотровых комплексов	32
3.1.1 Алгоритм оценки погрешности параметров инспекционных досмотровых комплексов	32
3.1.2 Математическая модель связи параметров инспекционных досмотровых комплексов	46
3.1.3 Алгоритм выбора максимальных энергий рентгеновского излучения	48
3.2 Конструктивные модернизации инспекционных досмотровых комплексов	54
3.3 Физические модернизации инспекционных досмотровых комплексов	56
4. Основные результаты	61
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	70
5.1 Предпроектный анализ	70
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	70
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. SWOT–анализ	71
5.2 Инициация проекта	75
5.3 Планирование управления научно–техническим проектом	75
5.3.1 План проекта. Диаграмма Ганта	76
5.3.2 Бюджет научно–технического исследования	77

5.3.3 Проектная организационная структура научного исследования.	83
Реестр рисков	
5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	85
6. Социальная ответственность	88
6.1 Введение	88
6.2 Производственная безопасность	89
6.3 Экологическая безопасность	100
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	101
6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	104
Заключение	106
Список публикаций	108
Список используемых источников	110
Приложение А	116
Приложение Б	117
Приложение В	118
CD–диск	В конверте на обложке

## **Введение**

В последнее десятилетие наблюдается рост международной напряженности, который проявляется в постепенном увеличении региональных конфликтов и в усиливающейся угрозе международного терроризма. Также следует отметить стремительный рост правонарушений и преступлений, которые связаны с внешнеторговой деятельностью.

Всемирная глобализация привела к существенному переделу рынков стран производителей и стран потребителей. Увеличение объемов товаров, перемещаемых через границы государств, образование таможенных союзов, внешнеэкономическая ситуация в мире – все это привело к невозможности проведения тотального таможенного контроля транспортных и пассажирских потоков традиционными методами. Создание, усовершенствование и масштабное внедрение различных реализаций инспекционно–досмотровых комплексов существенно снизило влияние указанных негативных факторов на экономическую и национальную безопасность стран, в том числе и Российской Федерации.

Инспекционно–досмотровые комплексы позволяют получить информацию о содержании транспортных упаковок, транспорта, багажа и ручной клади, в результате анализа теневого радиационных изображений. В конце XX века получил развитие метод дуальных энергий – метод позволяющий идентифицировать вещество и отнести его к классу органических или неорганических соединений. Метод дуальных энергий позволяет повысить вероятность обнаружения товаров, не указанных в декларации, идентифицировать материалы и, как следствие, предотвратить нарушение таможенных законов государства, а также предотвратить на ранней стадии готовящиеся теракты.

Метод дуальных энергий наиболее сложен в практическом использовании при досмотровом контроле крупногабаритных объектов – авиационных, железнодорожных и морских контейнеров, легковых и грузовых

транспортных средств. Сложность обусловлена особенностями взаимодействия высокоэнергетического рентгеновского излучения с веществом.

Совершенствование высокоэнергетических инспекционных досмотровых комплексов с функцией идентификации материалов объектов контроля развивается по нескольким основным направлениям, которые связаны с источниками и регистраторами рентгеновского излучения; алгоритмами формирования и обработки радиометрической информации в методе дуальных энергий; механическими улучшениями существующих конструкций комплексов.

Наиболее **актуальными направлениями** продолжают оставаться задачи выбора и оценки параметров и характеристик высокоэнергетических инспекционных досмотровых комплексов на основе полномасштабного учета различных аспектов, связанных с особенностями физических закономерностей испускания, взаимодействия и регистрации рентгеновского излучения применительно к высокоэнергетическому методу дуальных энергий. Этот вывод подтверждается увеличением числа научных публикаций, числа новых исследований и экспериментов, посвященных указанной теме.

**Объект исследований** – высокоэнергетические инспекционные досмотровые комплексы с функцией идентификации веществ и материалов объектов контроля и их фрагментов.

**Предмет диссертационных исследований** – закономерности формирования конечных идентификационных изображений высокоэнергетического метода дуальных энергий.

**Цель исследований** – разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик высокоэнергетического инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ объектов контроля и их фрагментов методом дуальных энергий.

**Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:**

- исследовать трансформацию шумов в исходных радиографических изображениях в шумы идентификационных изображений метода дуальных энергий;
- разработать математическую модель высокоэнергетического инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ объектов контроля, которая должна связать основные параметры источника высокоэнергетического излучения, объекта контроля, геометрической схемы контроля, линейки радиометрических детекторов с потребительскими свойствами комплекса – разрешением по параметру идентификации и производительностью;
- разработать алгоритм выбора максимальных энергий рентгеновского излучения в методе дуальных энергий, применительно к задаче идентификации материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов;
- провести цикл экспериментальных исследований по оценке работоспособности предлагаемых алгоритмов.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы математического и имитационного моделирования, планирования научных экспериментов, статистической обработки результатов экспериментальных исследований.

***Научная новизна:***

- разработан алгоритм трансформации шумов в исходных радиографических изображениях в шумы идентификационных изображений метода дуальных энергий;
- разработана математическая модель высокоэнергетического инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ объектов контроля, которая должна связать основные параметры источника высокоэнергетического излучения, объекта контроля, геометрической схемы контроля, линейки радиометрических детекторов с потребительскими свойствами комплекса – разрешением по параметру идентификации и производительностью;

- создан алгоритм выбора максимальных энергий рентгеновского излучения в методе дуальных энергий, применительно к задаче идентификации материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов;
- проведен цикл экспериментальных исследований по оценке работоспособности предлагаемых алгоритмов.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что полученные в результате диссертационных исследований алгоритмы обработки информации и рекомендации позволят повысить точность оценки линейных и площадных размеров объекта контроля, уменьшить уровень шума на радиографических изображениях, позволят выбрать оптимальные параметры и характеристики для высокоэнергетического ИДК.

**Реализация результатов работы.** Результаты выполненных исследований реализованы в алгоритмах обработки цветных фотографических изображений, позволяющих оценить характеристики неоднородностей объектов контроля по цифровым цветным оптическим изображениям.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждались на XIX Всероссийской научно–практической конференции «Качество – стратегия XXI века» (Томск 2014), VI Всероссийской научно–технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» (Томск 2016), International Scientific Conference on "Radiation–Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials" (2014, Tomsk, Russia).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 3 печатных работах, из них 1 статья опубликована в журнале, реферируемом в SCOPUS и WEB of Science.

**На защиту выносятся:**

- алгоритм трансформацию шумов в исходных радиографических изображениях в шумы идентификационных изображений метода дуальных энергий;

- математическая модель высокоэнергетического инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ объектов контроля, которая должна связать основные параметры источника высокоэнергетического излучения, объекта контроля, геометрической схемы контроля, линейки радиометрических детекторов с потребительскими свойствами комплекса – разрешением по параметру идентификации и производительностью;
- алгоритм выбора максимальных энергий рентгеновского излучения в методе дуальных энергий, применительно к задаче идентификации материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов;
- результаты экспериментальной оценки работоспособности предлагаемых алгоритмов;
- анализ основных механических усовершенствований для существующих ИДК;
- анализ основных физических усовершенствований (источники излучения и детекторы излучения) для существующих ИДК.

## 1 Обзор литературы

Терроризм на протяжении уже многих десятилетий является одной из главных угроз обществу. Подтверждением этого факта служат масштабные террористические акты, проводимые по всему миру [1,2]: в 2001 г. были атакованы башни–близнецы, США; в сентябре 2004 г. была захвачена школа в Беслане, Северная Осетия, Россия; аэропорт Домодедово (Россия) подвергся террористическому акту в 2011г.; в 2010–2011 гг. произошли взрывы в метро Москвы (Россия) и Минска (Беларусь). Взрывы в мире продолжают и по сей день.

Для предотвращения террористических актов за рубежом и в России сформировалось современное научно–техническое направление, которое носит название «антитеррористический контроль и диагностика». Это направление предназначено для обеспечения безопасности пассажирских и грузовых перевозок, поиску и идентификации подозрительных веществ, предотвращения нелегального ввоза опасных веществ и материалов [2–6].

Можно выделить следующие основные задачи, которые решаются на основе систем антитеррористического контроля и диагностики (далее систем досмотрового контроля объектов): обнаружение отравляющих, радиоактивных и взрывчатых веществ; взрывных устройств; всех видов поражающих элементов и оружия; запрещенных психотропных веществ, обнаружение контрабанды денежных средств и драгоценных металлов [2].

Все досмотровое оборудование может быть разделено на следующие группы [6]:

1. Технические средства и системы, которые обеспечивают обнаружение объектов по их визуально воспринимаемым образам (изображению внутренней структуры, по внешнему виду, тепловому изображению и др.). К ним относятся:

- досмотровые телевизионные системы;

- оптические увеличительные приборы (лупы), технические эндоскопы, досмотровые зеркала, видеоскопы и бороскопы;

- досмотровые радиационные системы;

- тепловизоры;

2. Технические средства и системы, которые обеспечивают выявление объектов по физическим свойствам материалов и веществ (магнитной или диэлектрической проницаемости, по электропроводности, химическому составу, плотности, наличию нелинейных электромагнитных свойств, радиоактивного излучения и др.). К таким средствам можно отнести следующее оборудование:

- приборы нелинейной радиолокации;

- металлоискатели;

- устройства контроля радиационной обстановки;

- обнаружители взрывчатых и наркотических веществ (газоанализаторы, дрейфспектрометры, комплекты химических реактивов, приборы радиационной гамма–квантовой и корпускулярной интроскопии, иммунохимические диагностикумы);

- приборы ультразвуковой эхолокации.

3. Технические средства и системы, которые обеспечивают выявление объектов по признакам работы в них механизмов и электронных устройств (по вибрациям, электромагнитным излучениям, характерным звукам и др.). К этим средствам относится аппаратура обнаружения радиоизлучений (в том числе, побочных электромагнитных излучений), виброакустических и акустических сигналов.

4. Комплексные досмотровые системы, которые обеспечивают совмещение возможностей и функций двух или нескольких видов досмотрового оборудования в одной системе. К этим системам можно отнести металлоискатели со встроенным датчиком ионизирующего излучения, мобильные роботизированные комплексы и другие совмещенные системы.

Как следует из многочисленных публикаций (например, [5–10]), в настоящее время среди различных видов досмотровых систем одно из доминирующих положений занимают системы цифровой рентгенографии (СЦР).

Термин «цифровая рентгенография» подразумевает под собой совокупность методов неразрушающего радиационного контроля и диагностики, при которых радиационное изображение просвечиваемого объекта контроля (ОК) преобразуется на определенном этапе в цифровой сигнал. Далее цифровой сигнал заносится в память компьютера и преобразуется в двумерный массив измерительных данных, который может подвергаться различным видам цифровой обработки (настройка яркости, контрастирование, масштабирование, сглаживание и т.п.) и, наконец, воспроизводится на экране дисплея в виде полутонового изображения, непосредственно воспринимаемого оператором [11,12].

Основные усилия специалистов в сфере радиационного досмотрового контроля направлены на создание высокоэффективных источников и детекторов ионизирующего излучения, а также на разработку алгоритмов и программного обеспечения для обработки результатов регистрации излучения.

Так, например, в Институте неразрушающего контроля Томского политехнического университета (ИНК ТПУ), совместно с ООО «Фотон», были созданы следующие источники ионизирующего излучения [13]:

- ускорители заряженных частиц – бетатроны МИБ – 7,5Д и РХВ – 9Д (Шток – Т), используемые для досмотрового контроля грузовых автомобилей;
- рентгеновские аппараты РАП 160–2Д, РАП 200–4Д, РАП 300–4Д, используемые для досмотрового контроля легковых автомобилей.

В той же работе [13] отмечается, что в досмотровых СЦР для регистрации прошедшего через ОК излучения чаще всего применяются три основных типа детекторов:

- люминесцентные экраны совместно с ПЗС–камерой;
- люминесцентные экраны совместно с фотодиодной матрицей;

– сцинтилляционные кристаллы в комплексе с фотодиодной линейкой.

В ИНК ТПУ была также разработана оригинальная специализированная программа «Диада», предназначенная для визуального воспроизведения внутренней структуры ОК. Данная программа была успешно опробована в различных системах цифровой радиографии, в частности, – для обнаружения недопустимых радиоэлектронных элементов в печатных платах.

В [14] проведен анализ требований, предъявляемых к измерителям (мониторам) мощности дозы тормозного излучения бетатронов, предназначенных для использования в досмотровых системах и при контроле изделий большого размера. Разработанные авторами мониторы имеют радиационный ресурс не менее 10000 ч, работают в широком температурном диапазоне от – 20 до +50°С и обеспечивают измерение мощностей доз от 0,05 до 50 Р/мин. Геометрические размеры одного из мониторов на энергию 9 МэВ составляют 30x25x285 мм<sup>3</sup>.

Большинство задач досмотрового контроля посвящено идентификации вещества анализируемого объекта. Целью идентификации веществ является отнесение вещества исследуемого ОК к классу веществ, перемещение которых через границу или перевозка авиационным транспортом запрещены или строго регламентированы.

Для идентификации веществ широко применяют методы с использованием источников ионизирующего излучения. Наибольшее распространение получили методы дуальных энергий (МДЭ) [15], основанные на оценке ослабления рентгеновского излучения ОК для двух источников, максимальные энергии которых подбираются специальным образом. Возможны также и различные модификации данного метода: однократное просвечивание ОК с регистрацией излучения двумя детекторами, расположенными один за другим (по ходу луча), просвечивание ОК дважды – при двух различных напряжениях на рентгеновской трубке (что соответствует двум эффективным энергиям излучения), и т.д [26].

При помощи первого метода удастся разделять предметы по эффективному атомному номеру ( $Z_{\text{eff}}$ ) и, используя цветную палитру идентификации, получить цветное изображение [16], где:

- "легкие" вещества с  $Z_{\text{eff}} < 10$  – оттенки оранжевого цвета;
- "средние" вещества с  $10 < Z_{\text{eff}} < 20$  – оттенки зеленого цвета;
- "тяжелым" веществам с  $Z_{\text{eff}} > 20$  присваивают оттенки синего цвета.

В [15] оценен вклад различных составляющих в интегральную погрешность измерения эффективного атомного номера вещества однородного ОК методом дуальных энергий в области энергий до 200 кэВ. Показано, что наибольший вклад в погрешность измерения эффективного атомного номера вносят отклонения максимальных энергий в спектрах рентгеновского излучения.

В работе [17] исследована высокоэнергетическая реализация МДЭ. Указанная реализация основана на предварительном сканировании ОК узкими пучками высокоэнергетического рентгеновского излучения с двумя максимальными энергиями, получении двух цифровых радиографических изображений, последующем раздельном оценивании вкладов комптоновского рассеяния и эффекта рождения пар в ослабление рентгеновского излучения и в формировании изображения параметра идентификации.

Для выпускаемого серийно малогабаритного бетатрона МИБ 4,5/7,5 в работе [18] проведена серия расчетов по оценке влияния различных физических факторов на качество идентификации. Рассмотрены следующие факторы: отклонения максимальных энергий высокоэнергетического рентгеновского излучения от номинальных значений; излучение, рассеянное в объекте контроля; излучение, рассеянное в конструкции досмотрового комплекса. Проведенные исследования доказывают необходимость учета рассмотренных факторов при проектировании досмотровых комплексов с возможностью идентификации веществ ОК и их фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий.

В [19] разработан новый алгоритм обнаружения материалов для рентгеновской досмотровой системы багажа, используемой в аэропорте и стратегических местах. Алгоритм основан на МДЭ и спектральном анализе цифровых радиационных изображений ОК.

С целью повышения точности автоматического распознавания ядерных и взрывчатых материалов в досматриваемых объектах (например, контейнеров в морских портах) с использованием МДЭ и высокоэнергетических источников рентгеновского излучения (с максимальной энергией от 2,5 МэВ до 9 МэВ) в [20] предложено осуществлять просвечивание ОК тремя веерными пучками от трех источников излучения. При этом каждый пучок формируется от отдельного источника излучения и регистрируется на соответствующую линейку детекторов [26].

В работе [21] проведено моделирование досмотровой системы контейнеров, содержащей в качестве источника излучения ускоритель 4/9 МэВ и линейку из 960 детекторов с размерами апертуры отдельного детектора  $6 \times 6$  мм<sup>2</sup>. Для идентификации материалов применялась реализация МДЭ, основанная на предположении, что детекторы обладают функцией дискриминатора энергии, т.е. осуществляется разделение потоков импульсов на выходе детекторов электронным путем. Разработанная в результате исследований методика позволила идентифицировать следующие материалы: тканеэквивалентный пластик, Al; Fe; Ag.

Авторами работ [16, 22] исследованы вопросы повышения информативности цифровых радиографических изображений за счет регистрации рентгеновского излучения, прошедшего через ОК, в двух, трех и более энергетических диапазонах. Получены трехэнергетические рентгеновские изображения тестовых объектов с эффективным атомным номером от 7,08 до 8,07. Достигнута точность разделения веществ по эффективному атомному номеру порядка 5 % при использовании детекторов типа сцинтиллятор–фотодиод на базе сцинтиллятора ZnSe(Te).

В работе [23] сообщается, что компания «Rapiscan Systems» разработала досмотровый комплекс на основе линейного ускорителя на 9 МэВ для обнаружения специального ядерного материала в грузовых контейнерах. В данном комплексе используется двухступенчатый процесс досмотра. На первом этапе (основное сканирование) контейнер быстро и полностью проверяется по сформированным с помощью двух независимых массивов детекторов изображениям: традиционный основной массив с высоким пространственным разрешением и массив «грубого» энергетического разрешения. Эти два массива детекторов используются для обнаружения объектов с высоким эффективным атомным номером  $Z$ , таких как свинец, вольфрам, уран. Указанные объекты могут быть потенциальными защитными материалами либо специальными ядерными материалами. На втором этапе области контейнера, которые были определены как области с высоким эффективным атомным номером  $Z$ , повторно проверяются. Проверка осуществляется путем просвечивания найденных областей пучком рентгеновского излучения и регистрацией нейтронного или гамма-излучения, которые испускаются материалом области с высоким значением эффективного атомного номера  $Z$ , если эта область содержит специальный ядерный материал [26].

В [24] представлено описание опыта практического использования СЦР, предназначенной для досмотра грузовых контейнеров с целью обнаружения специального ядерного материала. Сообщается, в частности, что скорость сканирования ОК составляет порядка 45 см/с. Используемая система цифровой радиографии имеет схожую структуру с досмотровым комплексом [23].

В [25] описана разработка СЦР на основе линейного ускорителя 3/6 МэВ для обнаружения контрабанды в авиационных контейнерах. Для ускоренного обнаружения подозрительного груза осуществляется просвечивание контейнеров под несколькими направлениями (мультивид). Для регистрации излучения используется линейка детекторов с размерами апертуры отдельного детектора  $6 \times 6 \text{ мм}^2$ . Скорость перемещения (сканирования) составляет около

0,2 м/с. Время, затрачиваемое на получение изображений контейнера в двух ортогональных видах, примерно равно 40 с.

Работа [27] посвящена первоначальной подготовке персонала для досмотрового контроля крупногабаритных грузов. Источник содержит информацию о существующих ИДК, рассказываются краткие теоретические положения о физических принципах генерации и регистрации рентгеновского излучения, объясняются конструктивные особенности ИДК. Отдельный раздел посвящен программному обеспечению для постобработки изображения.

Источник [28] рассказывает о ИДК, разработанных МИРЭА (серия «Шток»). Рассматриваются основные технические характеристики комплексов, внешний вид. Отдельное внимание уделено полученным при помощи комплекса цифровым радиографическим изображениям в теневом режиме (черно-белое изображение) и режиме дуальных энергий (цветное изображение). Данные комплексы были опробованы на олимпийских объектах Сочи в 2014 году, показали высокую надежность, эксплуатационные качества, а также высокие досмотровые характеристики.

В источнике [30] формулируется критерий адекватности математических моделей досмотровых комплексов с функцией идентификации веществ объектов контроля. Приведены математические выражения для определения критерия адекватности. Отмечается, что критерий адекватности математических моделей системы идентификации, существенным образом зависит от подхода к идентификации (идентификации по эффективному атомному номеру и идентификации по уровневым функциям), и от параметров критерия.

Проанализировав состояние развития ИДК можно сделать следующие выводы:

– совершенствование СЦР для досмотрового контроля объектов связано, главным образом, с улучшением и модернизацией источников и детекторов рентгеновского излучения, а также с разработкой высокоэффективных

алгоритмов и программного обеспечения цифровой обработки радиометрических сигналов и радиографических изображений;

– производительность досмотра может быть значительно увеличена путем применения двухступенчатой процедуры – основное сканирование всего объекта и последующее повторное сканирование выделенных подозрительных зон;

– для повышения эффективности досмотра целесообразно использовать в СЦР многоракурсное просвечивание объекта (мультивид) с одновременным использованием нескольких источников излучения и детекторных массивов;

– повышение надежности обнаружения несанкционированных включений в объектах возможно при дальнейшем развитии как методов увеличения пространственной разрешающей способности СЦР, так и методов идентификации веществ (методов дуальных энергий и их различных модификаций).[26]

## **2 Инспекционные досмотровые комплексы с функцией идентификации веществ**

Как отмечалось ранее **инспекционный досмотровый комплекс (ИДК)** представляет собой техническое средство таможенного контроля (комплекс технических средств), использующее проникающее ионизирующее излучение для получения теневого изображения объекта контроля и анализа содержимого легковых и крупногабаритных транспортных средств и грузов.

Современные ИДК без вскрытия и разгрузки грузового транспортного средства за минимальное время (2–3 мин) позволяют получить рентгеновское изображение его самого и перевозимых на нём товаров. При этом технические характеристики ИДК позволяют идентифицировать конструкционные узлы транспортного средства и, в ряде случаев, перевозимые товары, обнаруживать тайники, выявлять запрещённые к перевозке товары.

Лидирующими мировыми производителями ИДК являются компании трех стран – Германии, США и Китая. Фирмы, лидирующие в данном сегменте рынка: Smiths Heimann (Германия), являющееся дочерним предприятием Smiths Detection (Англия), Nuctech Company Limited (Китай), L3 communications, SAIC, AS&E, Rapiscan Systems (США).

На сегодняшний день ИДК являются самым эффективным средством для контроля содержимого автотранспортных средств, железнодорожных и морских контейнеров и на сегодняшний день ИДК оснащены практически все страны, входящие во Всемирную таможенную организацию, а их применение предписано Рамочными стандартами безопасности и облегчения мировой торговли.

Рассмотрим классификацию ИДК согласно СанПиН 2.6.1.2369–08 (см. Приложение 7) «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при обращении с лучевыми досмотровыми установками»

**Лучевые досмотровые установки (ЛДУ)** представляют собой установки, использующие ускорители электронов или рентгеновские трубки, которые

относятся к генерирующим источникам ионизирующего излучения, т. е. источники которые не содержат радиоактивных изотопов.

ЛДУ в отключенном состоянии не представляют радиационной опасности, их хранение и перевозка могут выполняться без специальных требований обеспечения радиационной безопасности.

В свою очередь ЛДУ бывают следующих видов:

*1. по применяемому источнику излучения ЛДУ делятся на:*

– рентгеновские установки для контроля багажа и товаров (РУДБТ), имеющие в своем составе одну или несколько рентгеновских трубок, при максимальном анодном напряжении 300 кВ;

– инспекционно–досмотровые ускорительные комплексы (ИДУК), имеющие в своем составе один или несколько ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ;

*2. по характеру использования ЛДУ делятся на стационарные, переносные и мобильные;*

*3. по режиму эксплуатации, степени радиационной опасности и конструктивным особенностям РУДБТ подразделяются на 3 типа:*

– РУДБТ 1–го типа – стационарные и мобильные досмотровые установки с закрытой досмотровой камерой и движущимся объектом контроля;

– РУДБТ 2–го типа – стационарные и мобильные досмотровые установки с закрытой досмотровой камерой, в которую помещается объект контроля;

– РУДБТ 3–го типа – переносные установки, источник рентгеновского излучения в которых не имеет стационарной радиационной защиты;

*4. по технологии контроля и конструктивным особенностям ИДУК разделяются на 2 типа:*

– ИДУК 1–го типа – стационарные и мобильные ИДУК с неподвижным источником ионизирующего излучения и движущимся объектом контроля.

– ИДУК 2–го типа – стационарные и мобильные ИДУК с неподвижным объектом контроля и движущимся источником ионизирующего излучения.

Разработанная ФТС России Концепция создания системы таможенного контроля крупногабаритных грузов и транспортных средств предполагает оснащение таможенной службы России различными модификациями ИДК. В Концепции ИДК классифицируют на стационарные, легко возводимые (перебазируемые), мобильные. В ней изложены требования к различным видам ИДК.

Рассмотрим более подробно требования ФТС России к техническим и функциональным возможностям и особенности конструктивного исполнения таких ИДК.

Первая категория – это стационарные ИДК. В стационарных ИДК применяются источники рентгеновского излучения с энергией до 10 МэВ. Данные комплексы требуют хорошей радиационной защиты и исполняются в стационарных защитных сооружениях. Чаще всего стационарные ИДК располагаются в морских и авиационных портах – места с большим грузопотоком. В стационарных комплексах реализуется следующие схемы контроля: неподвижный объект контроля – перемещающаяся досмотровая система (источник излучения и линейка детекторов), либо неподвижная досмотровая система (источник излучения и линейка детекторов) – перемещающийся объект контроля.

На рисунке 2.1 приведены примеры реализации стационарных ИДК фирмы Rapiscan Systems (рисунок 2.1 а, б) и фирмы NUCTECH (рисунок 2.1 в, г).

Ниже приведены технические требования, предъявляемые к стационарным ИДК:

1. проникающая способность (по стали) не менее 380 мм.
2. возможности обнаружения:
  - проволоки без преграды диаметром не более 0,5 мм;



а



б



в



г

Рисунок 2.1 – Реализация стационарных ИДК: а,б – комплексы фирмы Rapiscan Systems; в,г – комплексы фирмы NUCTECH

- проволоки за преградой из 100 миллиметровой стали диаметром не более 1,5 мм;
  - проволоки за преградой из 300 миллиметровой стали диаметром не более 9 мм.
3. контрастная чувствительность не более 3 %.
  4. программно–аппаратный комплекс ИДК должен позволять проводить анализ содержимого объекта контроля с помощью следующих функций:
    - ручная и автоматическая корректировка яркости изображения;
    - ручная и автоматическая корректировка контрастности изображения;
    - управление контрастной чувствительностью в динамическом режиме для выбранной области изображения;
    - воспроизведение рентгеновского изображения в негативе;

- раскрашивание полученного рентгеновского изображения в широком цветовом диапазоне (псевдоцвета);
- масштабирование (2х,4х,8х) выбранной области изображения;
- создание маркеров в подозрительных областях изображения.

Для питания установки необходимо трехфазное напряжение 380 В с частотой 50 Гц  $\pm$  1 %, а также необходимо однофазное напряжение 220 В с частотой 50 Гц. Обязательно наличие нейтрального провода и заземления всей установки.

ИДК должен быть оборудован дизельным либо бензиновым электрогенератором, обеспечивающим работу всех систем комплекса не менее 24 часов. ИДК должен иметь источник бесперебойного питания мощностью, достаточной для электропитания компьютеров и других информационных компонентов комплекса, а также систем безопасности в течение, как минимум, 10 мин.

В таблице 2.1 приведены сравнительные характеристики основных параметров стационарных ИДК трех основных фирм производителей, а также комплекса Шток–ТрГРММ и досмотрового комплекса ИНК ТПУ.

Таблица 2.1 – Параметры стационарных ИДК [27]

Тип системы	Энергия, МэВ	Проникающая способность (по стали)	Производительность	Скорость сканирования
Rapiscan Eagle F9000 Series	9	410 мм	25–30 в час	0,75 м/с
HCV–Stationary	6 или 9	От 330 до 410 мм	25–30 в час	6 и 24 м/ мин
TUSCAN FG9056	9	380 мм	30–40 в час	
TUSCAN PB2028TH	9	400	16 в час	0,4 м/с
Шток–ТрГРММ	4,5 и 9	350	20 в час	0,4 м/с
Комплекс ИНК ТПУ	4 и 9 4,5 и 7,5	400		0,4 м/с

Перебазируемые и легко–возводимые комплексы составляют вторую категорию ИДК. В целом данные модификации комплексов не сильно отличаются от стационарных систем. Отличительной чертой таких комплексов является то, что в таких системах чаще всего применяется следующая схема контроля: неподвижный объект контроля – перемещающаяся досмотровая система (источник излучения и линейка детекторов).

В данных комплексах применяются источники излучения с энергией до 6 МэВ. Использование таких источников приводит к тому, что уменьшается проникающая способность (320–380 мм по стали).

Применяются легко–возводимые и перебазируемы ИДК в большинстве своем на границах между государствами, морских портах, а также возможно применение на контрольно–пропускных пунктах закрытых объектов. На рисунке 2.2 представлено схематическое изображение легко–возводимого комплекса (рисунок 2.2 а) и перебазируемых комплексов фирмы NUCTECH и Rapiscan Systems (рисунок 2.2б и рисунок 2.2в соответственно).



а



б



в

Рисунок 2.2 – Схематическое изображение легко–возводимого комплекса (а) и перебазируемых комплексов фирмы NUCTECH (б) и Rapiscan Systems(в)

В таблице 2.2 приведены сравнительные характеристики основных параметров легко–возводимых и перебазируемых ИДК трех основных фирм производителей (NUCTECH, Rapiscan Systems, Smiths Heimann).

Таблица 2.2 – Параметры легко–возводимых и перебазируемых ИДК [26]

Тип системы	Энергия, МэВ	Проникающая способность (сталь)	Производительность	Скорость сканирования
Rapiscan Eagle G6000	3/6 (как опция)	340–400		
Rapiscan Eagle	4,5	300		0,4 м/с
HCVG 6035	6	350 мм 370 мм	12 (в час) 25 (в час)	6 м/мин 24м/мин
HCVG 6040	6	410 мм	23/17 в час	6 м/мин 24м/мин
THSCAN™ PB2028T	4	240	20	0,1– 0,3 м/с
THSCAN™ PB2028TH	9	400	16	0,2– 0,4 м/с
THSCAN MBI21SHL	6	до 320 мм	25 (в час)	0,4 м/с

Для увеличения производительности досмотрового контроля были разработаны мобильные ИДК. Благодаря тому, что источник излучения и детекторная линейка монтируются на шасси автомобиля, данная категория ИДК получила большее распространение по сравнению со стационарными, легко–возводимыми и перебазируемыми комплексами.

По сравнению с предыдущими категориями ИДК мобильные комплексы немного уступают в проникающей способности и требуют создания дополнительных санитарных зон для проведения досмотрового контроля (рисунок 2.3). Мобильные комплексы могут работать в двух режимах: режим сканирования (неподвижный объект контроля – перемещающаяся досмотровая система (источник излучения и линейка детекторов)) и в режиме портала (неподвижная досмотровая система (источник излучения и линейка детекторов) – перемещающийся объект контроля).

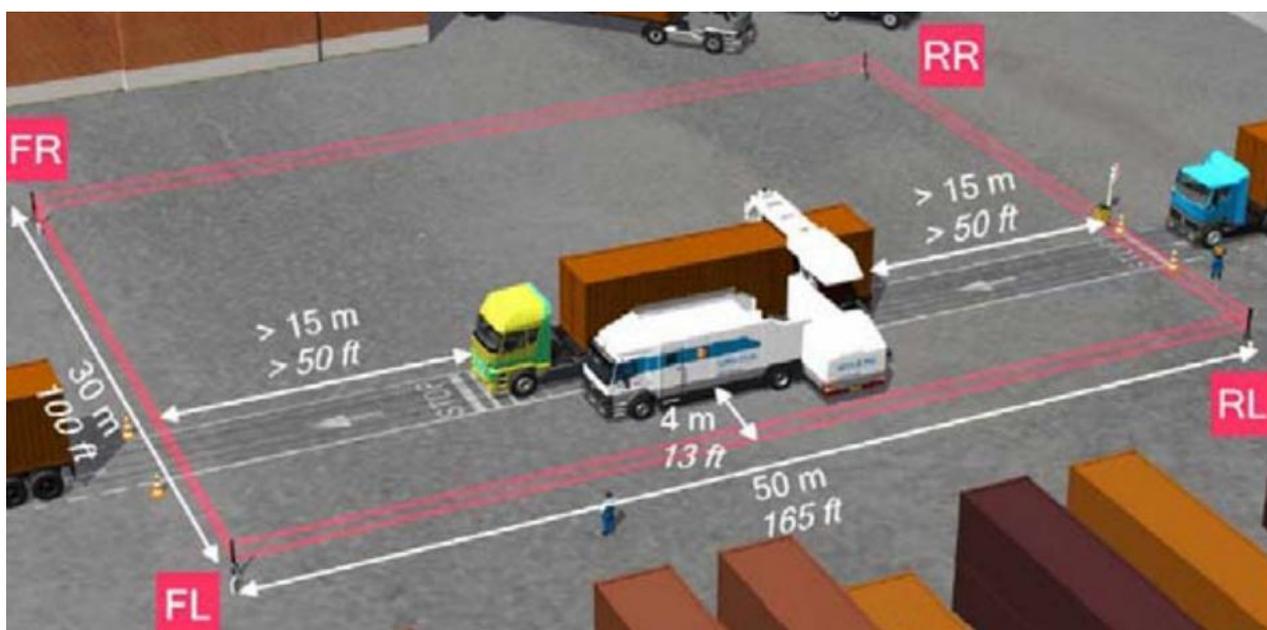


Рисунок 2.3 – Санитарная зона для режима сканирования с указанием расположения инфракрасных барьеров (FL, RL, FR, RR – инфракрасные барьеры)

Для обеспечения безопасности водителей во время проведения досмотрового контроля в режиме портала мобильные комплексы оборудованы оптическими датчиками, пересекая которые срабатывает система понижения энергии излучения до предельно допустимой. После пересечения кабиной источника и детекторов датчик срабатывает во второй раз, энергия излучения повышается и груз досматривается при максимальных энергиях.

На рисунке 2.4 представлены мобильные комплексы фирмы Rapiscan Systems (рисунок 2.4 а), Smiths Heimann (рисунок 2.4 б).



а



б

Рисунок 2.4 – Мобильные ИДК фирмы Rapiscan Systems (а), Smiths Heimann (б).

В таблице 2.3 приведены сравнительные характеристики основных параметров легко–возводимых и перебазируемых ИДК трех основных фирм производителей (NUCTECH, Rapiscan Systems, Smiths Heimann).

Таблица 2.3 – Параметры мобильных ИДК [26]

Тип системы	Энергия, МэВ	Проникающая способность	Производительность	Скорость сканирования
HCV–Mobile (HCVM 4028)	3,5/6	280 мм 310 мм	25/100 (сканирование/портал)	12 м/мин 24м/мин
Rapiscan Eagle M60	6	310 мм	25/100 (сканирование/портал)	0,13; 0,26; 0,4 м/с
TCSCAN MB1213LH	3/6	280	25/100 (сканирование/портал)	0,2– 0,4 м/с

Отметим основные достоинства и недостатки существующих ИДК.

Достоинства:

- возможность просматривать содержимое грузов без вскрытия;
- возможность идентифицировать вещества объекта контроля;
- повышение уровня безопасности населения;
- уменьшение времени проведения досмотрового контроля;
- высокая скорость сканирования объектов;
- повышение производительности досмотрового контроля.

Недостатки:

- технические особенности ИДК;
- дополнительное облучение персонала и населения;
- большое электропотребление (для установок на линейных ускорителях);
- переобучение персонала;
- недостаток технической литературы;
- высокая стоимость;
- срок окупаемости.

Скорость сканирования, производительность, проникающая способность и возможность идентификации веществ объекта контроля являются одними из важнейших параметров ИДК. Данные параметры зависят от следующих факторов: категорий просвечиваемых объектов контроля (массогабаритные параметры и транспортируемые материалы и объекты), мощности источника излучения, детекторов излучения, технических устройств и программных алгоритмов, необходимых для реализации ИДК.

На рисунке 2.5 представлена информация о массогабаритных параметрах различных категорий объектов (средняя длина и тоннаж объекта), подвергающихся досмотровому контролю.

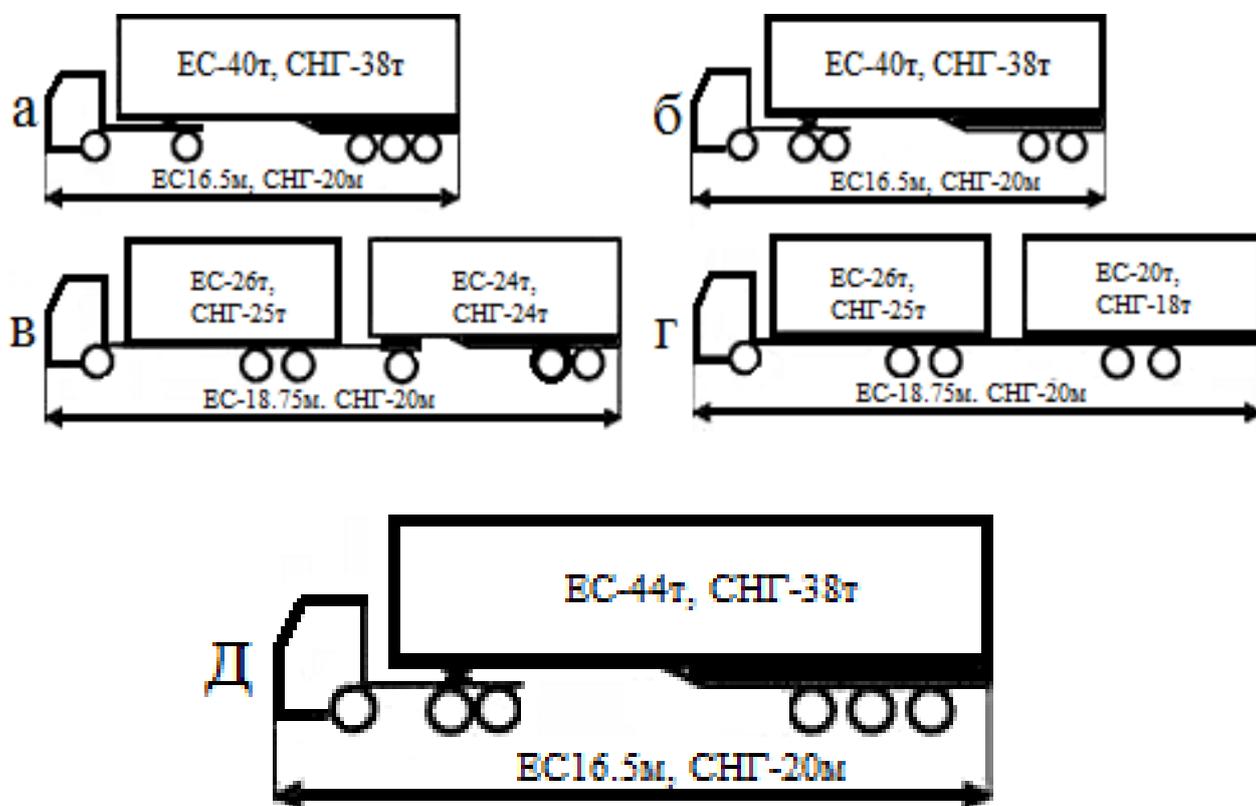


Рисунок 2.5 – Параметры крупногабаритных объектов : а, б, д – односоставный автопоезд; в, г – двухсоставный автопоезд

В приложении А (таблицы А1 и А2) приведены массогабаритные параметры грузовых контейнеров которые чаще всего используются для перевозки грузов.

Ниже рассмотрим основные направления возможной модернизации и усовершенствования, которые помогут улучшить параметры и характеристики существующих инспекционно–досмотровых комплексов.

### **3 Совершенствование и модернизация инспекционных досмотровых комплексов**

На сегодняшний день к ИДК предъявляется особое требование – комплекс должен обеспечивать максимальную информативность рентгеновского изображения при минимально возможной поглощенной дозе излучения просвечиваемым объектом.

При создании, модернизации, совершенствовании ИДК необходимо учитывать основные потребительские показатели, которым должен соответствовать итоговая система досмотрового контроля:

- продолжительность контроля;
- вероятность необнаружения нарушений таможенных правил;
- полнота контроля;
- коэффициент сохранения эффективности;
- коэффициент готовности;
- достоверность контроля;
- производительность контроля;
- скорость сканирования;
- мощность поглощенной дозы;
- величина геометрических искажений.

Показатели, которые характеризуют качество цифрового рентгеновского изображения в досмотровых установках, оценивается следующими характеристиками:

- проникающей способностью;
- контрастностью;
- яркостью;
- нерезкостью;
- зашумленностью изображения;
- разрешающей способностью.

Эти показатели обусловлены прикладным назначением получаемых изображений, но существенно зависят и от способа представления изображения в памяти компьютера. Так, при выводе изображения на экран компьютера оно представляется как набор пикселей, каждому из которых сопоставляется цифровой код, задающий оттенок цвета пикселя.

Процесс совершенствования и модернизации ИДК связан с доработкой и преобразованием конструктивных, физических и программных решений с дальнейшим их внедрением в существующие ИДК.

Далее рассмотрим основные конструктивные, физические и программные модернизации, благодаря которым возможно улучшение основных параметров и характеристик существующих ИДК.

### **3.1 Алгоритмы выбора и оценки параметров инспекционных досмотровых комплексов**

#### **3.1.1 Алгоритм трансформации шумов**

Во введении было отмечено, что под распознаванием (идентификацией) материалов объектов досмотрового контроля понимается отнесение материалов объектов или их фрагмента к одному из широких классов веществ. Упомянутое отнесение материалов на классы осуществляется двумя основными способами [32–36] – по эффективному атомному номеру и методом линий уровней.

В любой модификации метода дуальных энергий на начальной стадии формируются два цифровых радиографических изображения для двух, специальным образом подобранных, максимальных энергий рентгеновского излучения. Одним из основных показателей, характеризующих качество радиографического комплекса с функцией идентификации веществ объектов контроля и их фрагментов, является точность определения параметров идентификации. Этот показатель существенным образом зависит от многих факторов, например, от диапазонов изменения эффективных атомных номеров и размеров фрагментов ОК, от заданной погрешности оценки параметра

идентификации, от максимальных энергий высокоэнергетического рентгеновского излучения.

Как показал анализ литературных данных, вопрос оценки качества распознавания материалов ОК и их фрагментов для основных реализаций способа идентификации с помощью высокоэнергетического метода дуальных энергий не решен в полном объеме.

К основным требованиям, предъявляемым к характеристикам модифицированного алгоритма распознавания материалов объекта и его фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий для низкой мощности дозы, относятся требования к: разбиению материалов на классы; вероятности распознавания материалов; диапазону изменения массовых толщин объекта досмотрового контроля и его фрагментов; скорости обработки откалиброванных радиографических изображений. Разбиение материалов на классы осуществляется по эффективному атомному номеру  $Z$ .

Разбиение материалов на классы – органические материалы,  $5 \leq Z \leq 7$ ; материалы, металлы и сплавы с малым значением  $Z$ ,  $12 \leq Z \leq 14$ ; материалы, металлы и сплавы со средним значением  $Z$ ,  $23 \leq Z \leq 29$ ; 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>.

Скорость обработки откалиброванных радиографических изображений – время обработки изображений специализированной программой, реализующей алгоритм распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий, включая метод сегментации для одного изображения транспортного средства с грузом менее 12 секунд.

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 радиации до тестовых образцов должно быть более 2,5 м;
- поперечные размеры фрагмента объекта контроля, материал которого должен быть распознан, 10 см;
- разрядность аналогово–цифровых преобразователей – 24.

Для решения задачи идентификации веществ ОК и их фрагментов методом дуальных энергий, как уже было отмечено выше, используются различные варианты двух основных подходов [36]. В первом подходе оценивается эффективный атомный номер вещества объекта контроля. Во втором подходе [36] формируется изображение идентификационного параметра, значение которого в каждой точке изображения сравнивается с некоторыми линиями уровней, и по результатам сравнения принимается решение о сопоставлении вещества ОК с тем или иным классом веществ.

Упомянутые подходы существенно различаются по объему используемой предварительной информации и по алгоритмам обработки первичных радиографических изображений, поэтому необходимо рассмотреть специфику математических моделей идентификации веществ ОК с помощью МДЭ для каждого из указанных выше подходов.

Прежде чем начать разрабатывать математическую модель оценки точности веществ объекта контроля рассмотрим общую математическую модель, связанную с процессом формирования радиографических изображений.

На выходе цифрового радиографического комплекса с функцией идентификации веществ ОК максимальным энергиям рентгеновского излучения  $E_i$ ,  $i=1,2$  соответствуют исходные изображения  $\mathbf{J}_i = \{J_i(x, y) : (x, y) \in S\}$ ,  $i=1,2$ , здесь  $S$  – дискретное множество, принадлежащее  $\mathbf{R}^2$ . Физическое толкование исходных изображений – распределение поглощенной энергии первичного ослабленного рентгеновского излучения по множеству  $S$ .

Погрешность определения идентификационных параметров, связана с уровнями шумов в исходных изображениях. Математический алгоритм позволяет установить взаимную связь основной потребительской характеристики с параметрами досмотрового комплекса, поэтому более подробно проанализируем трансформацию шумов в процессе поэтапной обработки исходных изображений.

На первом этапе оценим уровни шумов в исходных изображениях. В первом приближении будем считать источник излучения точечным изотропным.

Пусть чувствительный объем единичного радиометрического детектора имеет форму прямоугольного параллелепипеда, центральная ось которого ориентирована на источник излучения. Радиометрический детектор имеет размер  $h_d$  в направлении распространения первичного пучка рентгеновского излучения, а в перпендикулярной плоскости –  $a_d \times b_d$ . Расстояние от источника излучения до лобовой поверхности детектора равно  $F$ .

На начальной стадии моделирования является известной некоторая характеристика источника рентгеновского излучения –  $P_{0\max}$ , например, мощность поглощенной дозы или экспозиционной дозы рентгеновского излучения в воздухе на расстоянии 1 м и  $\nu$  – частота импульсов источника импульсного рентгеновского излучения. Максимальная энергия  $E$  рентгеновского излучения является регулируемой величиной и может принимать значения в диапазоне от  $E_{\min}$  до  $E_{\max}$ . Система управления источником рентгеновского излучения позволяет формировать по некоторому закону последовательность чередующихся импульсов максимальными энергиями  $E_1$  и  $E_2$ ,  $E_{\min} < E_1 < E_2 < E_{\max}$ . Под пакетом импульсов будем понимать совокупность последовательных импульсов рентгеновского излучения, необходимых для формирования единичных строк исходных теневых радиационных изображений  $\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$ , соответствующих друг другу.

Для импульсных источников рентгеновского излучения время измерения логично измерять в периодах следования импульсов –  $1/\nu$ .

Количество импульсов в пакете  $n$ , необходимых для формирования одной строки идентификационного изображения, равно сумме импульсов с энергией  $E_1 - n_1$  и импульсов с энергией  $E_2 - n_2$ . Здесь идентификационное изображение – это распределение оценки эффективного атомного номера или идентификационного параметра метода линий уровней по множеству  $S$ . Значение  $n$  определяет производительность контроля. Максимальная производительность радиографического комплекса с функцией идентификации веществ ОК и его фрагментов достигается для  $n_1=1, n_2=1$ . Очевидно, что на практике рационально выдвигать требование  $n_2 < n_1$ . Введём параметр  $p=n_1/n_2$ . Если являются известными параметр  $p$  и количество импульсов в пакете  $n$ , то  $n_2=n/(1+p)$  и  $n_1=np/(1+p)$ .

Для потребителя представляет интерес минимальный размер фрагмента, вещества которого надёжно идентифицируется методом дуальных энергий. Пусть проекция указанного фрагмента на множество  $S$  состоит из  $M$  пикселей.

Отметим, что для каждого источника рентгеновского излучения с регулируемой максимальной энергией известна функция  $W$ , описывающая зависимость характеристики источника рентгеновского излучения  $P_0$  от текущего значения максимальной энергии  $E$ . Пусть указанная зависимость имеет вид

$$P_0(E) = P_{0\max} W(E, E_{\max}). \quad (3.1)$$

Функция  $W(E, E_{\max})$  в диапазоне максимальных энергий рентгеновского излучения свыше 2 МэВ является гладкой возрастающей функцией, например, для описания мощности поглощенной дозы используется степенная зависимость  $W(E, E_{\max}) = (E/E_{\max})^3$ .

Число фотонов  $N_{0i}$  рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ , пересекающих лобовую поверхность единичного детектора в единицу времени в случае отсутствия ОК, находится по формуле

$$N_{0i} \approx \frac{CP_{0\max} W(E_i, E_{\max}) a_d b_d}{\nu F^2 \int_0^{E_i} E f(E, E_i) \mu_{\text{ab air}}(E) dE}, \quad (3.2)$$

где  $C$  – коэффициент перевода характеристики источника рентгеновского излучения к размерности МэВ/с;

$f(E, E_i)$  – энергетический спектр рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ ;

$\mu_{\text{ab air}}(E)$  – линейный коэффициент поглощения фотонного излучения с энергией  $E$  в воздухе.

Пусть поток рентгеновского излучения ослабляется объектом контроля толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером вещества  $Z$ . 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

$$N_i(\rho H, Z) \approx N_{0i} \int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z) \rho H} [1 - e^{-\mu_d(E) h_d}] dE, \quad (3.3)$$

где  $m(E, Z)$  – массовый коэффициент ослабления фотонного излучения с энергией  $E$  веществом ОК;

$\mu_d(E)$  – линейный коэффициент ослабления фотонного излучения с энергией  $E$  материалом детектора.

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 фоновых шумов радиометрических детекторов имеет вид

$$I_i(\rho H, Z) = N_i(\rho H, Z) \overline{E_{i\text{ab}}(\rho H, Z)}, \quad (3.4)$$

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

$$\overline{E_{i\text{ab}}(\rho H, Z)} = \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{\text{ab}}(E)} f(E, E_i) e^{-m(E, Z) \rho H} [1 - e^{-\mu(E) h_n}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z) \rho H} [1 - e^{-\mu(E) h_n}] dE}, \quad (3.5)$$

где  $\overline{E_{ab}(E)}$  – среднее значение энергии зарегистрированного фотона с энергией  $E$  [37].

Дисперсии радиометрических сигналов  $I_i(\rho H, Z) - DI_i(\rho H, Z)$ ,  $i=1,2$  вычисляются по формуле [37]

$$DI_i(\rho H, Z) = n_i N_i(\rho H, Z) \overline{E_{iab}^2(\rho H, Z)} = n_i N_i(\rho H, Z) \overline{E_{iab}(\rho H, Z)}^2 \eta_i^2(\rho H, Z), \quad (3.6)$$

где  $\overline{E_{iab}^2(\rho H, Z)}$  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  $\overline{E_{iab}^2(\rho H, Z)}$  имеет вид, аналогичный (3.5),

$$\overline{E_{iab}^2(\rho H, Z)} = \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}^2(E)} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_x}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_x}] dE}, \quad (3.7)$$

где  $\overline{E_{ab}^2(E)}$  – среднее значение квадрата энергии зарегистрированного фотона с энергией  $E$ , которое может быть вычислено, например, с помощью формул из [37].

После подстановки (3.3) и (3.7) в формулу (3.6) получим выражение, связывающие дисперсию  $DI_i(\rho H, Z)$  с числом импульсов  $n_i$ .

$$DI_i(\rho H, Z) = N_i(\rho H, Z) n_i \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}^2(E)} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_x}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_x}] dE}. \quad (3.8)$$

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 изображений  $\mathbf{J}_i$  в результирующие изображения  $\mathbf{R}_i$  состоит из нескольких преобразований, к которым относятся калибровка по «чёрному», калибровка по «белому», нормировка на сигнал с

опорного детектора, логарифмирование. Калибровка по «чёрному» сводится к вычитанию средних значений уровней фоновых шумов радиометрических детекторов  $J_b$ . Можно считать  $J_b$  для детекторов детерминированными величинами. При калибровке по «белому» сигналы с измерительных детекторов нормируются на сигналы без объекта контроля  $I_{0i}=J_{0i}-J_b$  – калибровка. Трансформация исходных радиометрических сигналов  $J_i(x,y)$  в  $I_i(x,y)$ , а затем в  $R_i(x,y)$  описывается формулой

$$R_i(x, y) = -\ln \frac{J_i(x, y) - J_b}{J_{0i} - J_b} = -\ln \frac{I_i(x, y)}{I_{0i}}. \quad (3.9)$$

Значения  $R_i(x,y)$  численно равны лучевым 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 (3.9) по малым приращениям. Конечные выражения для вычисления дисперсий  $DR_1(\rho H, Z)$  и  $DR_2(\rho H, Z)$  для объекта контроля толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером  $Z$  имеют вид

$$DR_i(\rho H, Z) = \frac{DI_i(\rho H, Z)}{I_i^2(\rho H, Z)} + \frac{DI_i(0,0)}{I_i^2(0,0)}, \quad (3.10)$$

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

С учётом (3.4), (3.8) выражение (3.10) будет выглядеть следующим образом

$$DR_i(\rho H, Z) = \frac{\tau_i(\rho H, Z)}{n_i}, \quad \tau_i(\rho H, Z) = \frac{\eta_i^2(\rho H, Z)}{N_i(\rho H, Z)} + \frac{\eta_i^2(0,0)}{N_i(0,0)}, \quad (3.11)$$

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

*Замечание 1.* Калибровка по белому на практике осуществляется по большому количеству строк изображения  $k_0$ , поэтому оценки параметров  $\tau_i$  находятся с помощью выражения

$$\tau_i(\rho H, Z) = \frac{\eta_i^2(\rho H, Z)}{N_i(\rho H, Z)} + \frac{\eta_i^2(0,0)}{k_0 \overline{N_i(0,0)}}, \quad (3.12)$$

где  $\overline{N_i(0,0)}$  – выборочное среднее числа фотонов, зарегистрированных детектором без ОК. При больших значениях  $k_0$  второе слагаемое в суммах (3.11), (3.12) можно не учитывать.

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

*Замечание 2.* Выражения для оценки дисперсий  $R_1(\rho H, Z)$  и  $R_2(\rho H, Z)$  для объекта контроля толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером  $Z$  (3.10), (3.11) 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

$$D\left(\frac{I_i(\rho H, Z)}{I_{pi}}\right) = \frac{I_{pi}^2 D I_i(\rho H, Z) + I_i^2(\rho H, Z) D I_{pi}}{I_{pi}^4}. \quad (3.13)$$

Выражение (3.13) выведено для условия полной компенсации нестабильности, которая может достигаться в том случае, если нестабильно только число электронов, сбрасываемых на мишень ускорителя.

Из анализа выражения (3.13) следует, что при выполнении некоторых требований к опорному каналу оценка дисперсий сигналов  $R_1(\rho H, Z)$  и  $R_2(\rho H, Z)$  может осуществляться с помощью выражений (3.10), (3.12) с учётом первого замечания. Указанные выше требования в формализованном виде выглядят следующим образом

$$I_{pi} \gg I_i(\rho H, Z). \quad (3.14)$$

Физическая реализация ограничения (3.14) сводится к использованию в качестве опорного канала специального выделенного радиометрического детектора, работающего синхронно с измерительными каналами, отличающегося от них большим количеством зарегистрированных фотонов и меньшим значением коэффициента накопления флуктуаций.

### Идентификация по эффективному атомному номеру

В результате совместной обработки результирующих радиографических изображений  $\mathbf{R}_1$  и  $\mathbf{R}_2$  формируются изображения параметров МДЭ –  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ . Для каждой точки  $(x,y)$  множества  $S$  для оценки параметров МДЭ  $A(x,y)$  и  $B(x,y)$  решается система нелинейных уравнений

$$\begin{aligned}
 -\ln \frac{\int_0^{E_1} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-A(x,y)w_1(E)-B(x,y)w_2(E)} [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE}{\int_0^{E_1} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE} &= R_1(x, y) \\
 -\ln \frac{\int_0^{E_2} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_2) e^{-A(x,y)w_1(E)-B(x,y)w_2(E)} [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE}{\int_0^{E_2} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_2) [1 - e^{-\mu(E)h_a}] dE} &= R_2(x, y),
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

где  $w_1(E)$ ,  $w_2(E)$  – энергетические зависимости двух основных процессов взаимодействия фотонного излучения с веществом ОК.

В качестве первого процесса в системе (3.15) выступает эффект Комптона, а в качестве второго – эффект рождения пар.

Для решения системы (3.15) относительно параметров  $A(x,y)$  и  $B(x,y)$  необходимо знать значения максимальных энергий –  $E_1$  и  $E_2$ , энергетические спектры  $f(E, E_1)$  и  $f(E, E_2)$ , энергетические зависимости  $\overline{E_{ab}(E)}$ ,  $w_1(E)$  и  $w_2(E)$ .

В литературе имеются аналитические описания энергетических зависимостей среднего значения энергии зарегистрированного фотона [36] и сечений взаимодействия фотонного излучения с веществом, например, [37]. Помимо аналитических зависимостей могут быть использованы базы данных по взаимодействию гамма-излучения с веществом [38,39].

Определённая сложность в формировании предварительной информации для системы (3.15) связана с оценкой энергетических спектров высокоэнергетического рентгеновского излучения. В настоящее время используется аналитический подход к описанию  $f(E, E_i)$ , основанный на формуле Шиффа [40] с поправкой на ослабление в фильтрах источника излучения и поправкой на эффективность регистрации фотонного излучения.

На этапе решения системы (3.15) дисперсии случайных величин  $A$ ,  $B$  –  $DA$  и  $DB$ , а также ковариация  $\text{cov}(A, B)$  находятся с применением метода наименьших приращений. Конечные выражения для дисперсий  $DA(\rho H, Z)$ ,  $DB(\rho H, Z)$  и ковариации  $\text{cov}(A, B)(\rho H, Z)$  для объекта контроля толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером  $Z$  имеют вид

$$\begin{aligned} DA(\rho H, Z) &= \frac{g_{22}^2 DR_1(\rho H, Z) + g_{12}^2 DR_2(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}, \\ DB(\rho H, Z) &= \frac{g_{11}^2 DR_2(\rho H, Z) + g_{21}^2 DR_1(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}, \\ \text{cov}(A, B)(\rho H, Z) &= \frac{-g_{22}g_{21}DR_1(\rho H, Z) - g_{12}g_{11}DR_2(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

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

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

После подстановки (3.11) в (3.16) получим

$$\begin{aligned} DA(\rho H, Z) &= \frac{g_{22}^2 \tau_1(\rho H, Z)/n_1 + g_{12}^2 \tau_2(\rho H, Z)/n_2}{G^2(\rho H, Z)}, \\ DB(\rho H, Z) &= \frac{g_{11}^2 \tau_2(\rho H, Z)/n_2 + g_{21}^2 \tau_1(\rho H, Z)/n_1}{G^2(\rho H, Z)}, \\ \text{cov}(A, B)(\rho H, Z) &= \frac{-g_{22}g_{21} \tau_1(\rho H, Z)/n_1 - g_{12}g_{11} \tau_2(\rho H, Z)/n_2}{G^2(\rho H, Z)}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Конечный этап исследования трансформации шумов связан с оценкой дисперсии эффективного атомного номера. В области высоких энергий [36]

оценка эффективного атомного номера  $Z_V(\rho H, Z)$  связана с параметрами МДЭ следующим соотношением  $A(\rho H, Z)$  и  $B(\rho H, Z)$  [36]

$$Z_V(\rho H, Z) \approx \frac{B(\rho H, Z)}{A(\rho H, Z)}. \quad (3.18)$$

Применяя метод малых приращений к (3.18) получим для объекта контроля толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером вещества –  $Z$  формулу для вычисления дисперсии оценки эффективного атомного номера  $Z_V(\rho H, Z) - DZ_V(\rho H, Z)$

$$DZ_V(\rho H, Z) \approx \frac{A^2 DB(\rho H, Z) + B^2 DA(\rho H, Z) - 2AB \text{cov}(A, B)(\rho H, Z)}{A^4}. \quad (3.19)$$

Подставим выражения (3.17) в формулу (3.19). После несложных преобразований выражение для оценки дисперсии эффективного атомного номера будет иметь вид

$$DZ_V(\rho H, Z) \approx \frac{(Ag_{21} + Bg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z)/n_1 + (Ag_{11} + Bg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z)/n_2}{G^2(\rho H, Z)A^4}. \quad (3.20)$$

Нас интересует связь дисперсии оцениваемого параметра объекта контроля  $DZ_V(\rho H, Z)$  с числом импульсов в пакете  $n=n_1+n_2$ , параметром  $p=n_1/n_2$  и физическими характеристиками ОК – средним значением эффективного атомного номера вещества  $Z$  и толщиной  $\rho H$ . Параметры высокоэнергетической реализации метода дуальных энергий  $A(\rho H, Z)$  и  $B(\rho H, Z)$  связаны с  $Z$  и  $\rho H$  следующим образом [36]

$$A(\rho H, Z) = \rho H, \quad B(\rho H, Z) = Z\rho H. \quad (3.21)$$

В результате подстановки (3.21) в (3.20) с учётом  $n_2=n/(1+p)$  и  $n_1=np/(1+p)$  получим

$$DZ_V(\rho H, Z) \approx \frac{(1+p) \left[ (g_{21} + Zg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z)/p + (g_{11} + Zg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z) \right]}{nG^2(\rho H, Z)(\rho H)^2}. \quad (3.22)$$

Выражение (3.22) в совокупности с формулами (3.11), (3.12) позволяют оценить погрешность измерения эффективного атомного номера вещества ОК, исходя из времени формирования строк исходных радиографических изображений, параметров ОК, максимальных энергий рентгеновского

излучения. Погрешность измерения эффективного атомного номера  $Z$  можно оценить среднеквадратичным отклонением  $\Delta Z - \Delta Z_V(\rho H, Z) = \sqrt{DZ_V(\rho H, Z)}$ .

Очевидно, что существует оптимальное значение параметра  $p$ , при котором значение дисперсии  $DZ_V(\rho H, Z)$  при фиксированных значениях  $Z$  и  $\rho H$  является минимальным. Формула для вычисления  $p_{\text{opt}}$  имеет вид

$$p_{\text{opt}}(\rho H, Z) = \frac{g_{21} + Zg_{22}}{g_{11} + Zg_{12}} \sqrt{\frac{\tau_1(\rho H, Z)}{\tau_2(\rho H, Z)}}. \quad (3.23)$$

Значение дисперсии  $DZ_V(\rho H, Z)$ , соответствующее  $p_{\text{opt}}$ , находится подстановкой (3.23) в (3.22).

Формула (3.22) 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  $\Delta Z_{\text{lim}}$ . Указанный предельный уровень погрешности оценки эффективного атомного номера  $\Delta Z_{\text{lim}}$  называют разрешением по  $Z$ . Искомое выражение имеет вид

$$n(\rho H, Z) \approx \frac{(1+p)[(g_{21} + Zg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z)/p + (g_{11} + Zg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z)]}{G^2(\rho H, Z)(\rho H)^2 \Delta Z_{\text{lim}}^2}. \quad (3.24)$$

*Замечание 3.* Выражения (3.20)–(3.22), (3.24) 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 идентификационного параметра 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

$$\overline{DZ_V(\rho H, Z)} = \frac{DZ_V(\rho H, Z)}{M}. \quad (3.25)$$

С учётом (3.25) все упомянутые в замечании 3 формулы корректируются введением к правой части дополнительного сомножителя, равного  $1/M$ .

*Замечание 4.* Производительность контроля существенным образом зависит от толщины объекта контроля  $\rho H$ . Случайность внутренней структуры объектов досмотрового контроля ставит заказчиков перед некоторой дилеммой. Указанная дилемма сводится к ответу на вопрос – что предпочесть – высокую производительность контроля с качественной идентификацией веществ ОК и их фрагментов небольшой толщины или низкую производительность контроля с качественной идентификацией веществ ОК и их фрагментов значительной толщины.

### **Идентификация методом линий уровней**

Вторая реализация идентификации веществ объектов контроля и их фрагментов методом дуальных энергий можно назвать методом линий уровней [36]. В этой реализации на основе результирующих изображений  $\mathbf{R}_1$  и  $\mathbf{R}_2$  формируется идентификационное изображение

$$\mathbf{Q} = \left\{ Q(x, y) = \frac{R_2(x, y)}{R_1(x, y)} : (x, y) \in S \right\}. \quad (3.26)$$

Вещество ОК в точке с координатами  $(x, y)$  идентифицируется с некоторым веществом, если выполняется следующее ограничение

$$U_-(R_1(x, y)) < Q(R_1(x, y)) \leq U_+(R_1(x, y)), \quad (3.27)$$

где  $U_-(x, y)$ ,  $U_+(x, y)$  – линии уровня для сопоставляемого вещества.

Для объекта контроля толщиной  $\rho H$  и эффективным атомным номером вещества  $Z$  дисперсия идентификационного параметра  $Q(\rho H, Z) - DQ(\rho H, Z)$  находится с помощью разложения по малым приращениям

$$DQ(\rho H, Z) = \frac{R_1^2(\rho H, Z)DR_2(\rho H, Z) + R_2^2(\rho H, Z)DR_1(\rho H, Z)}{R_1^4(\rho H, Z)}. \quad (3.28)$$

После подстановки (3.10), (3.11) в (3.28) с учётом  $n_2=n/(1+p)$  и  $n_1=np/(1+p)$  получим

$$DQ(\rho H, Z) = \frac{(1+p)[R_1^2(\rho H, Z)\tau_2(\rho H, Z) + R_2^2(\rho H, Z)\tau_1(\rho H, Z)/p]}{nR_1^4(\rho H, Z)}. \quad (3.29)$$

Совокупность выражений (3.3), (3.9), (3.11) и (3.29) позволяет оценить погрешность параметра идентификации методом линий уровней –  $\Delta Q(\rho H, Z) = \sqrt{DQ(\rho H, Z)}$ .

Значение параметра  $p - p_{opt}(\rho H, Z)$ , для которого значение  $DQ(\rho H, Z)$  минимально, вычисляется по формуле

$$p_{opt}(\rho H, Z) = \frac{R_2(\rho H, Z)}{R_1(\rho H, Z)} \sqrt{\frac{\tau_1(\rho H, Z)}{\tau_2(\rho H, Z)}}. \quad (3.30)$$

Минимальное значение дисперсии  $DQ(\rho H, Z)$  находится подстановкой (3.30) в выражение (3.29).

Общее количество импульсов  $n$ , определяющее производительность досмотрового комплекса с идентификацией вещества ОК методом линий уровней, находится из (3.29), исходя из предельного уровня погрешности оценки параметра идентификации  $\Delta Q_{lim}$ ,

$$n(\rho H, Z) = \frac{(1 + p)[R_1^2(\rho H, Z)\tau_2(\rho H, Z) + R_2^2(\rho H, Z)\tau_1(\rho H, Z)/p]}{R_1^4(\rho H, Z)\Delta Q_{lim}^2}. \quad (3.31)$$

Выражения (3.3), (3.9), (3.11), (3.31) позволяют оценить производительность досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ ОК методом линий уровней. Следует учитывать замечания 3 и 4 из предыдущего раздела.

### 3.1.2 Математическая модель связи параметров инспекционных досмотровых комплексов

Выше отмечалось, что разработка ИДК основывается на принципах технической и физической реализуемости.

Введем новое понятие – **основной инвариант способа распознавания материалов МДЭ**. Запишем формулу для определения данного параметра:

$$I_{МДЭ} = PS_{\gamma}t, \quad (3.32)$$

где  $I_{МДЭ}$  – основной инвариант способа распознавания материалов МДЭ,

$P$  – мощность дозы излучения;

$t$  – время необходимое для создания пар строк первичных радиографических изображений;

$S_\gamma$  – часть площади изображения фрагмента, распознаваемый с вероятностью большей  $\gamma$ .

**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 объекта контроля, материал которого распознается с заданной степенью доверия.[41]

Пусть в процессе экспериментальных исследований для мощности дозы излучения  $P_0$  получено, что материал фрагмента с площадью изображения  $S_{\gamma 0}$  распознается с вероятностью  $\gamma$  для времени измерения  $t_0$ . В соответствии с проверяемой гипотезой запишем условие поддержания инварианта  $Inv$  (3.32) на одном и том же уровне:[41]

$$S_\gamma t = \frac{P_0 S_{\gamma 0} t_0}{P}, \quad (3.33)$$

Запишем математическое выражение определяющее производительность ИДК –  $\Pi$ . Экспериментально определяется усредненная длина  $L$  транспортного средства, вычисляется время  $t$  формирования пар строк, а также указывается количество столбцов  $M$  исходного изображения

$$\Pi = \frac{L}{Mt + T_0}, \quad (3.34)$$

где  $T_0$  – минимальный промежуток времени между началом сканирования двух транспортных средств, следующих друг за другом.

Поскольку используются импульсные источники излучения производительность ИДК напрямую зависит от частоты следования импульсов  $\nu$ . 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

энергий и  $k_H$  импульсов рентгеновского излучения с большей энергией. С учетом сказанного выражение (3.34) примет вид

$$\Pi = \frac{\nu L}{M(k_L + k_H) + T_0 \nu} \quad (3.35)$$

где  $k_L$  – число импульсов в пакете с низкой энергией,

$k_H$  – число импульсов в пакете с высокой энергией.

Если  $k_L=1$  и  $k_H=1$ , то производительность достигает максимума.

Подставим формулы (3.33) и (3.34) с учетом (3.35) в (3.32)

$$S_\gamma(k_L + k_H) = \frac{P_0 S_{\gamma 0}}{PM} \left( \frac{L}{\Pi_0} - T_0 \right) \quad (3.36)$$

Формула (3.36) представляет собой уравнение связи основных технических параметров ИДК.

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

Главным же фактором, снижающим качество функционирования инспекционного досмотрового комплекса с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий, является снижение количества фотонов, регистрируемых единичным радиометрическим детектором.

### **3.1.3 Алгоритм выбора максимальных энергий рентгеновского излучения**

Погрешность оценки параметра идентификации существенным образом зависит от максимальных энергий рентгеновского излучения.

## Математические модели идентификации методом дуальных энергий

Пусть фрагмент объекта контроля массовой толщиной  $\rho H$  изготовлен из материала с эффективным атомным номером  $Z$ . Радиометрические сигналы  $I(E_i, Z, \rho H)$ ,  $i=1..2$  за таким фрагментом для источников рентгеновского излучения с максимальными энергиями  $E_1$  и  $E_2$  и энергетическими спектрами  $F(E, E_1)$  и  $F(E, E_2)$  оцениваются с помощью формулы

$$I(E_i, Z, \rho H) = N_0(E_i) t_i \int_0^{E_i} \overline{E_{ab}(E)} F(E, E_i) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE \quad (3.37)$$

где  $N_0(E_i)$  – число фотонов, падающих на фронтальную поверхность детектора для объекта с нулевой массовой толщиной в секунду;

$m(E, Z)$  – массовый коэффициент ослабления фотонов с энергией  $E$  материалом с эффективным атомным номером  $Z$ ;

$\varepsilon(E, h)$  – эффективность регистрации фотонов с энергией  $E$  детектором толщиной  $h$ ;

$\overline{E_{ab}(E)}$  – среднее значение энергии зарегистрированного фотона;

$t_i$  – время измерения.

**Замечание 1.** Необходимо отметить одну особенность вычислений по формулам (3.37) при использовании в МДЭ одного источника рентгеновского излучения с регулируемой энергией. Эта особенность связана с зависимостью параметров, характеризующих поток рентгеновского излучения, от текущего значения максимальной энергии. Для каждого источника рентгеновского излучения с регулируемой максимальной энергией известна функция, описывающая зависимость мощности излучения от отношения текущего значения максимальной энергии к максимально возможному значению. Мощность рентгеновского излучения легко пересчитывается в любую другую характеристику, например, в плотность потока энергии или плотность потока частиц.

Пусть  $N_{0\max}$  – число фотонов рентгеновского излучения с максимально возможной энергией в спектре  $E_{\max}$ , которые пересекают фронтальную поверхность детектора для объекта с нулевой массовой толщиной в секунду.

Выражение для оценки числа фотонов  $N_0(E_i, E_{\max})$  в соответствии с замечанием 1 имеет вид

$$N_0(E_i, E_{\max}) = N_{0\max} R\left(\frac{E_i}{E_{\max}}\right) \quad (3.38)$$

Функция  $R\left(\frac{E_i}{E_{\max}}\right)$  пересчитывается из соответствующей зависимости мощности излучения от текущего значения максимальной энергии. Для максимальных энергий рентгеновского излучения, превышающих 1 МэВ, упомянутая зависимость близка к степенной функцией с показателем степени три. Следовательно, для описания функции  $R\left(\frac{E_i}{E_{\max}}\right)$  может быть применена формула

$$R\left(\frac{E_i}{E_{\max}}\right) = \left(\frac{E_i}{E_{\max}}\right)^3. \quad (3.39)$$

Радиометрические сигналы  $I(E_i, Z, \rho H)$  трансформируются следующим образом

$$P(E_i, Z, \rho H) = -\ln \frac{I(E_i, Z, \rho H)}{I(E_i, Z, 0)}. \quad (3.40)$$

Сигналы  $P(E_1, Z, \rho H)$  и  $P(E_2, Z, \rho H)$  представляют собой не что иное, как радиационные толщины фрагмента для соответствующих энергий.

### **Идентификация материалов по эффективному атомному номеру**

В результате совместной обработки сигналов  $P(E_1, Z, \rho H)$  и  $P(E_2, Z, \rho H)$  оцениваются параметры метода дуальных энергий  $A$  и  $B$  для анализируемого фрагмента ОК. Указанная процедура сводится к решению системы нелинейных уравнений

$$\begin{aligned}
& - \ln \frac{\int_0^{E_1} E_{ab}(E) F(E, E_1) \varepsilon(E, h) e^{-A(Z, \rho H) f_1(E) - B(Z, \rho H) f_2(E)} dE}{\int_0^{E_1} E_{ab}(E) F(E, E_1) \varepsilon(E, h) dE} = P(E_1, Z, \rho H) \\
& - \ln \frac{\int_0^{E_2} E_{ab}(E) F(E, E_2) \varepsilon(E, h) e^{-A(Z, \rho H) f_1(E) - B(Z, \rho H) f_2(E)} dE}{\int_0^{E_2} E_{ab}(E) F(E, E_2) \varepsilon(E, h) dE} = P(E_2, Z, \rho H)
\end{aligned} \tag{3.41}$$

здесь  $f_1(E)$ ,  $f_2(E)$  – энергетические зависимости эффекта Комптона и эффекта рождения пар.

Для решения системы (3.41) относительно параметров  $A$  и  $B$  необходимо знать значения максимальных энергий –  $E_1$  и  $E_2$ , энергетические спектры  $F(E, E_1)$  и  $F(E, E_2)$  и функциональные зависимости  $E_{ab}(E, E_1)$ ,  $E_{ab}(E, E_2)$  и  $f_1(E)$ ,  $f_2(E)$ .

В литературе имеются многочисленные аналитические описания энергетических зависимостей процессов взаимодействия фотонного излучения с веществом, например, [36–39]. Помимо аналитических зависимостей могут быть использованы базы данных по ослаблению гамма-излучения с веществом [36–39].

*Замечание 2.* Определённая сложность в формировании предварительной информации для системы (3.41) связана с оценкой энергетических спектров высокоэнергетического рентгеновского излучения. В настоящее время используется аналитический подход к описанию  $F(E, E_i)$ , основанный на формуле Шиффа с поправкой на ослабление в фильтре источника излучения.

Трудностей, указанных в замечании 2, лишен один из способов нахождения параметров МДЭ, основанный на комплексе предварительных калибровочных измерений. В указанном способе информация об энергетическом спектре используется в неявном виде.

Параметры  $A$  и  $B$  МДЭ связаны с характеристиками фрагмента ОДК  $\rho H$  и  $Z$  соотношениями

$$A(\rho H, Z) = \rho H, B(\rho H, Z) = \rho H Z. \quad (3.42)$$

Из соотношений (3.42) выводится простейшее выражение для оценки эффективного атомного номера  $Z$

$$Z = \frac{B(\rho H, Z)}{A(\rho H, Z)}. \quad (3.43)$$

### **Идентификация методом линий уровней**

Способ идентификации материалов ОДК и их фрагментов методом линий уровней не предполагает решения систем уравнений вида (3.41). Этот способ основан на определении идентифицирующего параметра  $Q$  для анализируемого фрагмента объекта по известным сигналам  $P(E_1, Z, \rho H)$  и  $P(E_2, Z, \rho H)$  с помощью следующего выражения

$$Q(P(E_1, Z, \rho H)) = \frac{P(E_2, Z, \rho H)}{P(E_1, Z, \rho H)}, \quad (3.44)$$

На последующем сравнении значений  $Q(P(E_1, Z, \rho H))$  с уровневыми линиями, построенными на стадии калибровки для материалов, ассоциирующихся с классами идентификации.

### **Выбор оптимальных энергий**

В качестве основного критерия выбора максимальных энергий применительно к задаче идентификации вещества ОК можно принять минимум среднеквадратического отклонения оценки параметра идентификации.

### **Оценка погрешности определения эффективного атомного номера**

Для уменьшения громоздкости выражений обозначим  $P_i = P(E_i, Z, \rho H)$ ,  $i=1,2$ . Связь  $\sigma(Z)$  с дисперсиями  $\sigma^2 A$ ,  $\sigma^2 B$  и ковариацией  $\text{cov}(A, B)$  параметров МДЭ описывается выражением

$$\sigma(Z) = \sqrt{\frac{\sigma^2 B}{A^2} + \frac{B^2 \sigma^2 A}{A^4} - \frac{2B \text{cov}(A, B)}{A^3}}. \quad (3.45)$$

В результате учета (3.42) и (3.43) выражение (3.45) будет выглядеть следующим образом

$$\sigma(Z) = \frac{1}{\rho H} \sqrt{\sigma^2 B + Z^2 \sigma^2 A - 2Z \text{cov}(A, B)} . \quad (3.46)$$

Формулы для оценки дисперсий  $\sigma^2 A$ ,  $\sigma^2 B$  и ковариации  $\text{cov}(A, B)$  имеют вид

$$\sigma^2 A = \frac{g_{22}^2 \sigma^2 P_1 + g_{12}^2 \sigma^2 P_2}{(g_{11} g_{22} - g_{12} g_{21})^2}, \quad \sigma^2 B = \frac{g_{21}^2 \sigma^2 P_1 + g_{11}^2 \sigma^2 P_2}{(g_{11} g_{22} - g_{12} g_{21})^2},$$

$$\text{cov}(A, B) = -\frac{g_{21} g_{22} \sigma^2 P_1 + g_{11} g_{12} \sigma^2 P_2}{(g_{11} g_{22} - g_{12} g_{21})^2}, \quad (3.47)$$

$$g_{ij} = \frac{\int_0^{E_i} f_j(E) E_{ab}(E) F(E_i, E) \varepsilon(E, h) e^{-m(E, Z) \rho H} dE}{\int_0^{E_i} E_{ab}(E) F(E_i, E) \varepsilon(E, h) e^{-m(E, Z) \rho H} dE}, \quad i = 1 \dots 2, \quad j = 1 \dots 2.$$

Дисперсии  $\sigma^2 P_1$  и  $\sigma^2 P_2$  связаны с дисперсиями сигналов  $I(E_1, Z, 0)$ ,  $I(E_2, Z, 0)$  и  $I(E_1, Z, \rho H)$ ,  $I(E_2, Z, \rho H)$  соотношениями

$$\sigma^2 P_1 = \frac{\overline{E_{1ab}} \eta_1^2}{I_1} + \frac{\overline{E_{01ab}} \eta_{01}^2}{I_{01}}, \quad \sigma^2 P_2 = \frac{\overline{E_{2ab}} \eta_2^2}{I_2} + \frac{\overline{E_{02ab}} \eta_{02}^2}{I_{02}}, \quad (3.48)$$

здесь  $\overline{E_{iab}}$ ,  $\overline{E_{iab}^2}$  и  $\eta_i^2$  – средние значения энергии, квадрата энергии зарегистрированного фотона и коэффициента накопления флуктуаций для рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_i$ .

Значения  $\overline{E_{iab}}$ ,  $\overline{E_{iab}^2}$ ,  $\eta_i^2$  находятся следующим образом

$$\overline{E_{iab}} = \int_0^{E_i} E_{ab}(E) F(E, E_i) \varepsilon(E, h) e^{-m(E, Z) \rho H} dE$$

$$\overline{E_{iab}^2} = \int_0^{E_i} E_{ab}^2(E) F(E, E_i) \varepsilon(E, h) e^{-m(E, Z) \rho H} dE, \quad (3.49)$$

$$\eta_i^2 = \frac{\overline{E_{iab}^2}}{\overline{E_{iab}}^2}$$

где  $\overline{E_{ab}^2}(E)$  – среднее значение квадрата энергии зарегистрированного фотона с энергией  $E$ .

Совокупность выражений (3.37)–(3.43), (3.45)–(3.49) является основой выбора максимальных энергий в способе идентификации материалов ОК и их фрагментов методом дуальных энергий по эффективному атомному номеру.

### **Оценка погрешности определения параметра идентификации методом линий уровней**

Погрешность параметра идентификации  $Q$  для объекта из материала с эффективным атомным номером  $Z$  и массовой толщиной  $\rho H$  вычисляется следующим образом

$$\delta^2 Q(\rho H, Z) = \frac{\sigma^2 P_1(\rho H, Z)}{P_1^2(\rho H, Z)} + \frac{\sigma^2 P_2(\rho H, Z)}{P_2^2(\rho H, Z)}. \quad (3.50)$$

Выражение (3.50) в совокупности с формулами (3.37)–(3.40), (3.48), (3.49) составляет основу методики выбора максимальных энергий в способе идентификации материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов методом линий уровней.

## **3.2 Конструктивные модернизации инспекционных досмотровых комплексов**

В рассмотренной ранее классификации ИДК было отмечено, что каждая разновидность досмотровых систем отличается по своему конструктивному исполнению. Проанализировав существующие способы реализации ИДК, были выявлены технические недочеты, которые требуют доработки и модернизации. Начнем с технических улучшений для мобильных досмотровых систем.

Основной проблемой мобильных систем является использование комплексов, в которых рамка детекторов находится в подвешенном состоянии с жестко закрепленным концом. Во время движения комплекса по неровной поверхности, сильных порывах ветра, возникают колебания, которые негативно сказываются на конечном радиографическом изображении. Изображение приобретает нерезкость по границам, и становится более зашумленным.

Для обеспечения плавности хода и исключения дефектов изображения необходимо внедрение амортизационной системы рамки с детекторами. В нижнюю часть рамки должно быть предусмотрено вмонтирование амортизационной стойки в сборе с пружиной и колесом. Покрышка должна быть изготовлена из резины, которая используется для межсезонной езды. Данная резина обладает повышенной стойкостью к износу и может работать в любые погодные условия. Для внедрения предлагаются два вида амортизационных стоек: однотрубный автомобильный амортизатор с пружиной средней жесткости, либо пружинно–эластомерные амортизаторы, применяемые для гашения мелких колебаний используемых в велосипедах.

На рисунке 3.1 и 3.2 представлен внешний вид автомобильного и велосипедного амортизаторов соответственно.



Рисунок 3.1 – Автомобильный амортизатор с продольной осью крепления вала колеса



Рисунок 3.2 – Пружинно–эластомерный велосипедный амортизатор

Одним из важных технических дополнений в мобильном комплексе является система позволяющая менять угол просвечивания системой источник излучения – детекторная линейка. Такое техническое усовершенствование позволяет повысить возможность обнаружения веществ и предметов расположенных параллельно источнику излучения и линейке детекторов. Реализация такого просвечивания основана на работе зубчатой передачи, на которой находится источник излучения с рамкой. Благодаря программному алгоритму система может поворачиваться на 5–30 градусов.

Основным конструктивным дополнением для стационарных комплексов является внедрение в систему второго источника излучения и второй линейки детекторов, взаимно перпендикулярных друг другу. Несмотря на то, что стоимость комплекса при этом возрастает, возможность обнаружения запрещенных веществ и их более подробная идентификация также возрастает. Данная система может быть реализована только тогда, когда объект контроля перемещается мимо неподвижных источников излучения. Равномерное перемещение создается при помощи передвижных платформ либо конвейерного протягивания. На рисунке 3.3 приведена схема стационарного комплекса с двумя источниками и детекторами излучения.

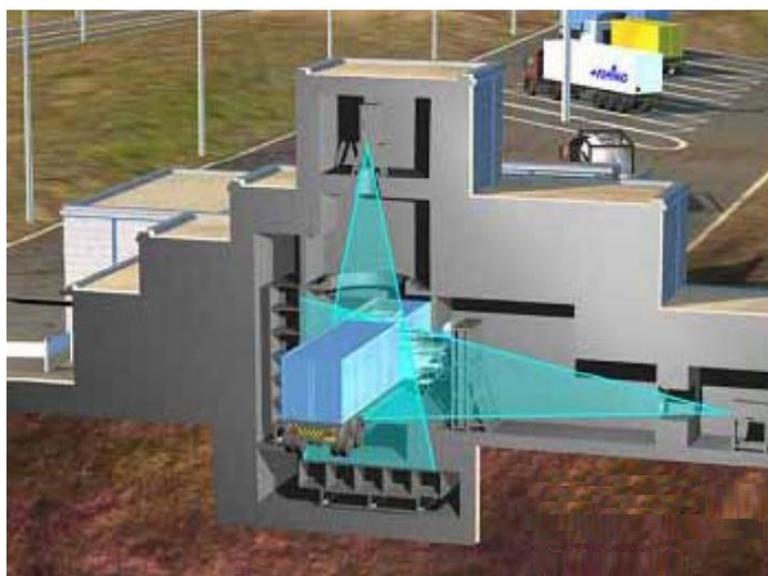


Рисунок 3.3 – Стационарный комплекс с двумя взаимно перпендикулярными источниками и детекторами

Легко–возводимые и перебазируемые комплексы являются производными от стационарных и мобильных комплексов. Поэтому в них могут использоваться те же технические улучшения, что и указанные выше. Однако такие нововведения в данные комплексы очень затратны и не несут практической значимости.

### **3.3 Физические модернизации инспекционных досмотровых комплексов**

Досмотровый комплекс состоит из следующих основных элементов: источника рентгеновского излучения; коллиматора источника; системы детекторов; аналогово–цифровых преобразователей; программного обеспечения формирования первичных радиографических изображений; алгоритмов и программного обеспечения трансформации первичных радиографических изображений в изображения метода дуальных энергий.

В качестве источников излучения могут использоваться линейные и циклические (бетатроны) ускорители электронов.

Линейные ускорители электронов получили новое применение в сфере досмотрового контроля. Используя указанные выше ускорители в целях инспекционного досмотрового контроля, можно получить энергию рентгеновского излучения до 10 МэВ.

Комплексы, построенные на основе линейных ускорителей электронов, предназначены для обнаружения тяжелых и радиоактивных материалов, а также для проведения досмотрового контроля железнодорожных составов (Rapiscan System), линейные ускорители нашли свое применение и обычных системах досмотра. Основными достоинствами таких комплексов являются:

- большая мощность пучка при любых энергиях;
- высокая проникающая способность по стали (340 мм);
- высокая скорость сканирования.

Однако при всем обилии достоинств данные комплексы обладают существенными недостатками:

- огромные массогабаритные параметры;
- значительные временные и материальные затраты на возведение комплексов;
- высокая стоимость эксплуатации комплексов;
- высокое энергопотребление.

Для инспекционного досмотрового контроля большее распространение получили малогабаритные импульсные бетатроны (МИБ). Использование бетатронов кардинально уменьшает массогабаритные параметры и требует меньших затрат на изготовление и установку конечного продукта (комплекса). Чаще всего применяются бетатроны, которые способны генерировать последовательность импульсов с энергиями равными 4 и 6 МэВ. Однако, как показывают эксперименты, проведенные на комплексе РКНЛ РКД ИНК ТПУ, большей производительностью и большей эффективностью обладает комплекс, разработанный на базе бетатрона с энергиями импульсов равными 4,5 и 9 МэВ.

К настоящему времени отсутствуют объективные и экспериментально подтвержденные данные о четко очерченных областях применения различных ускорителей электронов. Поскольку задачи, которые можно решать при помощи данных комплексов, абсолютно одинаковы.

Отметим основные достоинства комплексов работающих на основе МИБ с энергиями импульсов 4,5 и 9 МэВ по сравнению с установками на линейных ускорителях и бетатронах с энергиями 4 и 6 МэВ:

- меньшие массогабаритные параметры;
- более прост монтаж;
- проникающая способность по стали свыше 350 мм;
- меньшие материальные затраты;
- высокий уровень идентификации веществ.

Из недостатков следует отметить невысокую мощность источника высокоэнергетического рентгеновского излучения и, следовательно, низкую

производительность контроля, возникновение шумов, отсутствие возможности съемки в двух перпендикулярных плоскостях.

Детекторы ионизирующего излучения играют основную роль в формировании рентгеновских изображений. Для нужд досмотрового контроля чаще всего применяются детекторы, в основе которых лежит сцинтилляционный эффект.

Сцинтилляционные детекторы на базе неорганических монокристаллов являются классическими детекторами, используемыми при регистрации гамма и рентгеновского излучения. В таблице 3.1 приведены сцинтилляционные детекторы, которые получили наибольшее распространение.

Таблица 3.1 – Неорганические сцинтилляционные детекторы

Материал	Свойства	Основные применения
Nal(Tl)	Очень высокий световыход, хорошее энергетическое разрешение	Сцинтилляционные счетчики, медицинская физика, радиационный мониторинг, высокотемпературные приложения
CsI(Tl)	Негигроскопичный, прочный	Физика высоких энергий и частиц, радиационный контроль, фосвич детекторы ит.д.
LaCl <sub>3</sub> :Ce(0.9)	Очень высокий световыход, очень хорошее энергетическое разрешение	Сцинтилляционная спектроскопия высокого разрешения, медицинская физика, радиационный мониторинг
<sup>6</sup> Lil(Eu)	Высокое значение нейтронного сечения, высокий световыход	Детекторы тепловых нейтронов и спектроскопия
LYSO	Высокая плотность и атомное число Z, быстрый	Физические исследования, ПЭТ, Физика высоких энергий
BGO	Высокая плотность и атомное число	Физика высоких энергий, ПЭТ, геофизические исследования, анти-комптоновские спектрометры.
CdWO <sub>4</sub>	Очень высокая плотность, слабое послесвечение, длительное время высвечивания	Прямые измерения X-rays, компьютерная томография (КТ)
PbWO <sub>4</sub>	Быстрый, высокая плотность, слабое послесвечение	Физические исследования (калориметрия)

Вольфрамат кадмия обладает высокой плотностью и эффективным зарядом ядра. Данный сцинтиллятор способен хорошо поглощать гамма кванты и рентген. Именно поэтому большие объёмы вольфрамата кадмия используются производителями высокоэнергетических инспекционных досмотровых систем безопасности для проведения таможенного досмотра крупногабаритных грузов. Однако применение вольфрамата кадмия как сцинтиллятора осложняется относительно большим временем высвечивания (12–15 мкс), что не позволяет использовать его в детекторах с высокой скоростью счёта.

В последнее время все большую популярность приобретают сцинтилляторы на основе галогенидов лантана. Световыход таких кристаллов сравним со световыходом сцинтиллятора NaI(Tl). Кристаллы галогенидов лантана обладают более коротким временем высвечивания и высоким энергетическим разрешением. Благодаря данным параметрам галогениды лантана имеют большой интерес со стороны производителей гамма-спектрометрического оборудования.

Тем не менее, трудности, связанные с характерным радиоактивным загрязнением месторождений лантаноидов и сильной анизотропией температурного коэффициента линейного расширения, приводят к сложным технологиям и высокой стоимости изготовления данных сцинтилляторов. Собственная активность и сильная анизотропия температурного коэффициента линейного расширения являются существенными недостатками этого сцинтиллятора.

## 4 Основные результаты

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

Для иллюстрации применимости алгоритмов, приведённых выше, для оценки погрешности определения параметров идентификации высокоэнергетическим методом дуальных энергий была осуществлена серия расчётов среднеквадратичных отклонений параметров идентификации для двух пар максимальных значений рентгеновского излучения –  $E_1=4,5$  МэВ,  $E_2=7,5$  МэВ и  $E_1=4,5$  МэВ,  $E_2=9$  МэВ.

Толщины ОК  $\rho H$  варьировались от 10 до 120 г/см<sup>2</sup>, а эффективный атомный номер  $Z$  принимал значения 6, 13, 26 и 82. Расчёты проводились для бетатрона МИБ–4/9 с характеристиками  $P_{0\max}=20$  Р/мин для и  $E_{\max}=9$  МэВ,  $\nu=200$  импульсов в секунду.

Геометрическая схема контроля характеризовалась параметрами: фокусное расстояние  $F=4,2$  м; радиометрические детекторы на основе сцинтиллятора из  $\text{CdWO}_4$  толщиной  $h_d=50$  мм и поперечными размерами  $a_d \times b_d = 5 \times 6$  мм<sup>2</sup>. Значения  $n_1=3$ ,  $n_2=1$ . Минимальное количество пикселей в проекции на изображающую поверхность надёжно идентифицируемого фрагмента –  $M=16$ .

При помощи программы MathCAD были рассчитаны параметры  $\Delta Z_V$  и  $\Delta Q$ , основываясь на математических выражениях приведенных выше.

Результаты расчётов в зависимости от толщины объектов и материала ОК представлены в таблице 4.1 (для  $\Delta Z_V$ ) и таблице 4.2 (для  $\Delta Q$ )

Проанализировав расчетные данных, представленные в таблице 4.1 можно сделать вывод о том, что:

- погрешность определения  $Z$  резко возрастает для объектов с малыми (менее 20 г/см<sup>2</sup>) и большими (более 100 г/см<sup>2</sup>) толщинами;
- погрешность определения  $Z$  резко уменьшается при увеличении значения максимальной энергии источника.

Таблица 4.1 – Зависимость среднеквадратичного отклонения оценки параметра идентификации  $\Delta Z_V$  от  $\rho H$

ОК	$E_1 - E_2$ , МэВ	$\rho H$ , г/см <sup>2</sup>											
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
C	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	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	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	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

Таблица 4.2 – Зависимость среднеквадратичного отклонения оценки эффективного атомного номера  $\Delta Q \times 0,01$  от  $\rho H$  материала ОК

ОК	$E_1 - E_2$ , МэВ	$\rho H$ , г/см <sup>2</sup>											
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
C	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	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	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	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

Проанализировав расчетные данные, представленные в таблице 4.2 можно сделать вывод о том, что:

- погрешность определения параметра идентификации  $Q$  намного меньше зависит от толщин ОК, чем погрешность определения  $Z$ ;
- погрешность определения параметра идентификации  $Q$  практически не меняется с ростом энергии излучения;

### Экспериментальные исследования

Для подтверждения работоспособности алгоритмов, предназначенных для оценки погрешности параметров идентификации веществ ОК и их фрагментов с помощью различных реализаций МДЭ, была проведена серия

экспериментальных исследований на инспекционном досмотровом комплексе ТПУ.

Тестовый объект, состоящий из фрагментов различной толщины из органических материалов, алюминия, железа и свинца, сканировали двумя узкими пучками рентгеновского излучения  $E_1=4,5$  МэВ,  $E_2=9$  МэВ. Условия экспериментов отличались от условий расчётных примеров только мощностью экспозиционной дозы –  $P_{0max}=5$  Р/мин. Указанная мощность была выбрана для обеспечения устойчивой и стабильной работы бетатрона в течение длительного времени.

На рисунках 4.1 и 4.2 приведены результаты сопоставления экспериментальных и расчётных зависимостей  $\Delta Z_V(\rho H)$  и  $\Delta Q_V(\rho H)$ .

Из анализа данных, представленных на рисунках 4.1 и 4.2 следует, что в исследуемом диапазоне изменения толщин ОК экспериментальные оценки погрешности определения идентификационных параметров МДЭ либо близки к расчётным значениям, либо меньше их. Это доказывает применимость предлагаемых алгоритмов для оценки погрешности определения эффективного атомного номера и идентификационного параметра метода линий уровней на практике.

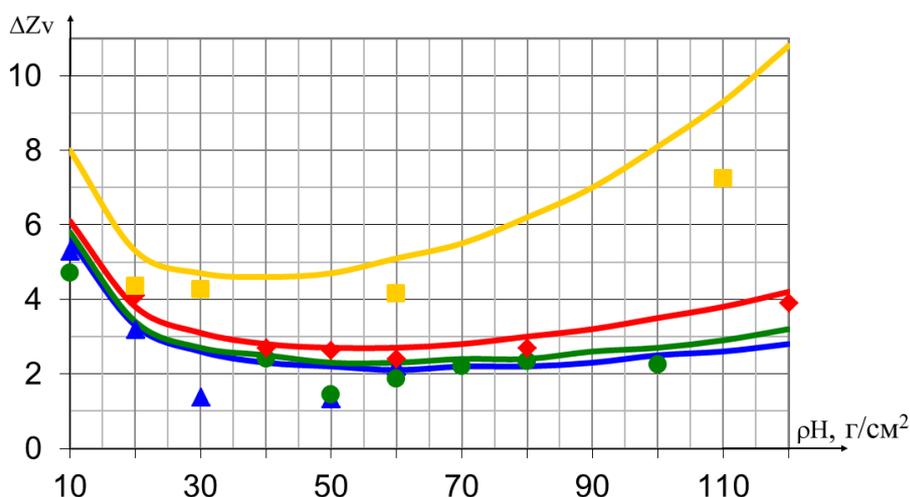


Рисунок 4.1 – Расчётные и экспериментальные зависимости  $\Delta Z_V(\rho H)$ :

- расчёт, ■ — эксперимент, материал – Pb;
- расчёт, ◆ — эксперимент, материал – Fe;
- расчёт, ● — эксперимент, материал – Al;
- расчёт, ▲ — эксперимент, органические материалы

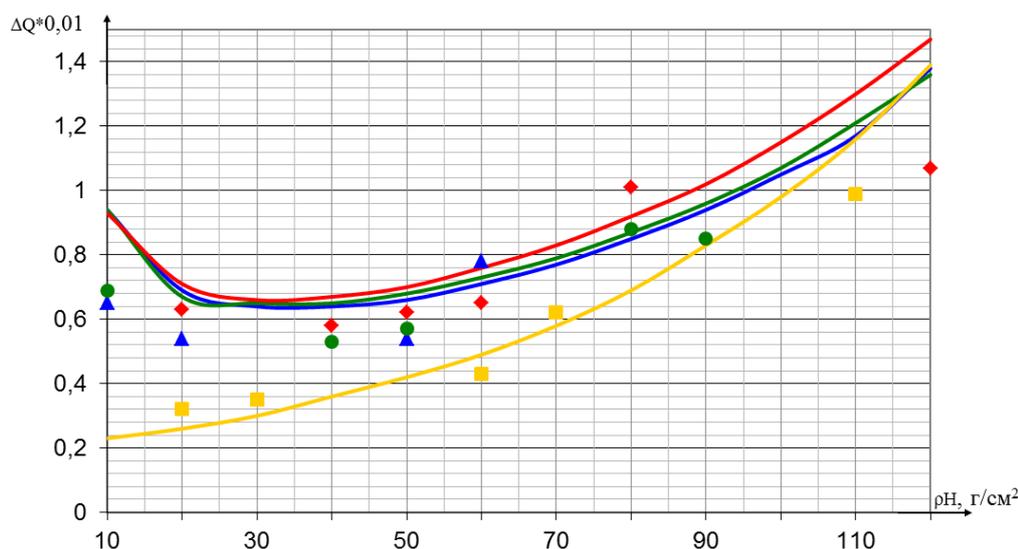


Рисунок 4.2 – Расчетные и экспериментальные зависимости  $\Delta Q(\rho H)$ :

- расчёт, ■ — эксперимент, материал – Pb;
- расчёт, ◆ — эксперимент, материал – Fe;
- расчёт, ● — эксперимент, материал – Al;
- расчёт, ▲ — эксперимент, органические материалы

### Выбор соотношения импульсов в пакете

Погрешность определения параметров идентификации МДЭ существенным образом зависит от значения  $p$ . Параметр  $p$  равен отношению количества импульсов с меньшей максимальной энергией рентгеновского излучения в пакете импульсов к количеству импульсов с большей максимальной энергией. Выше подчёркнуто, что существуют оптимальные значения параметра  $p$  –  $p_{\text{opt}}$ , для которых значения дисперсий идентификационных параметров минимальны.

Параметр  $p_{\text{opt}}$  для идентификационного параметра  $Z$  вычисляется с помощью формулы (3.23), а для идентификационного параметра  $Q$  – с помощью выражения (3.30). Проведена серия расчётов зависимостей  $p_{\text{opt}}(\rho H, Z)$  для идентификационных параметров  $Z$  и  $Q$  для условий расчётного примера рассмотренного выше. В таблице 4.3 приведены зависимости  $p_{\text{opt}}(\rho H)$  для объектов из углерода, алюминия, железа и свинца.

Из анализа данных, представленных в таблице 4.3, можно сделать следующие выводы. Первый вывод – с возрастанием толщины объекта  $\rho H$  значения  $p_{\text{opt}}$  при идентификации и по  $Q$ , и по  $Z$  возрастают. Второй вывод –

значения  $p_{\text{opt}}$  при идентификации по  $Q$  практически близки к аналогичным значениям  $p_{\text{opt}}$  при идентификации по  $Z$ , расхождение не более 10 %. Третий вывод – значения  $p_{\text{opt}}$  при использовании пары максимальных энергий 4,5 – 9 МэВ всегда больше значений  $p_{\text{opt}}$  при использовании пары максимальных энергий 4,5 – 7,5 МэВ. Можно сделать следующие рекомендации по применению таблицы 3. Количество импульсов в пакете  $n$  выбирается по формулам (3.24) или (3.31) с учётом замечаний 3, 4. Количество импульсов большей энергии  $n_2$  – это максимум из двух чисел – ближайшего целого числа к  $n/(1+p_{\text{opt}})$  и 1, а в качестве  $n_1$  логично взять максимум ближайшего целого числа к  $np_{\text{opt}}/(1+p_{\text{opt}})$  и 1.

Таблица 4.3 – Оптимальные значения  $p_{\text{opt}}$

		$E_1 - E_2,$ МэВ	$\rho H, \text{ г/см}^2$											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
C	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	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	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	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

## **Результаты расчетов оптимальных максимальных энергий в способе распознавания материалов объектов контроля методом дуальных энергий**

С целью апробации предлагаемых методик выбора энергий в способах распознавания материалов объектов контроля была проведена серия расчетов для объектов с различными толщинами из материалов с эффективными атомными номерами 6, 13, 26 и 82. Массовые толщины изделий варьировали от 10 до 120 г/см<sup>2</sup> для области максимальных энергий рентгеновского излучения от 2 до 9 МэВ.

### **Распознавание материалов по эффективному атомному номеру**

Для фотонов рентгеновского излучения с максимальной энергией свыше 2 МэВ преобладающими эффектами взаимодействия с веществом являются эффект Комптона и эффекта рождения. В расчетах для описания функций  $f_1(E)$ ,  $f_2(E)$  и  $m(E)$  использовались данные по взаимодействию гамма-излучения с веществом [38–39].

На рисунках 4.3–4.6 для иллюстрации приведены зависимости  $\delta Z(E_1)$  для различных толщин  $\rho H$  и углерода ( $Z=6$ ), алюминия ( $Z=13$ ), стали ( $Z=26$ ) и свинца ( $Z=82$ ). Зависимости рассчитывались по формулам (3.38)–(3.50) с учетом равного количества фотонов рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_1$  и  $E_2$ . Анализ функций  $\sigma Z(E_1)$  позволяет сделать ряд выводов. Зависимости  $\sigma Z(E_1)$  имеют слабовыраженный минимум, более выраженный минимум характерен для больших толщин ОК  $\rho H$  и больших значений эффективных атомных номеров  $Z$  материалов ОК. Слабая выраженность минимумов зависимости  $\sigma Z(E_1)$  означает то, что ошибка в выборе энергии  $E_1$  на 0,4–0,6 МэВ не приведет к заметному увеличению среднеквадратического отклонения оценки эффективного атомного номера.

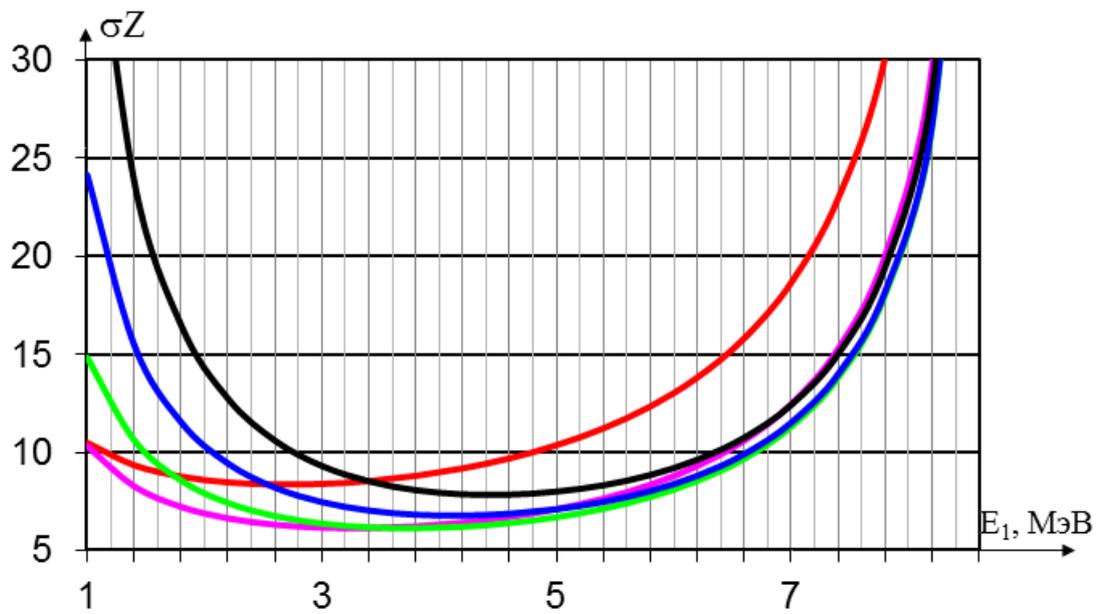


Рисунок 4.3 – Зависимости  $\sigma Z(E_1)$  для углерода,  $E_2=9$  МэВ:

- $\rho_H=20$  г/см<sup>2</sup>; —  $\rho_H=80$  г/см<sup>2</sup>;
- $\rho_H=40$  г/см<sup>2</sup>; —  $\rho_H=1000$  г/см<sup>2</sup>;
- $\rho_H=60$  г/см<sup>2</sup>

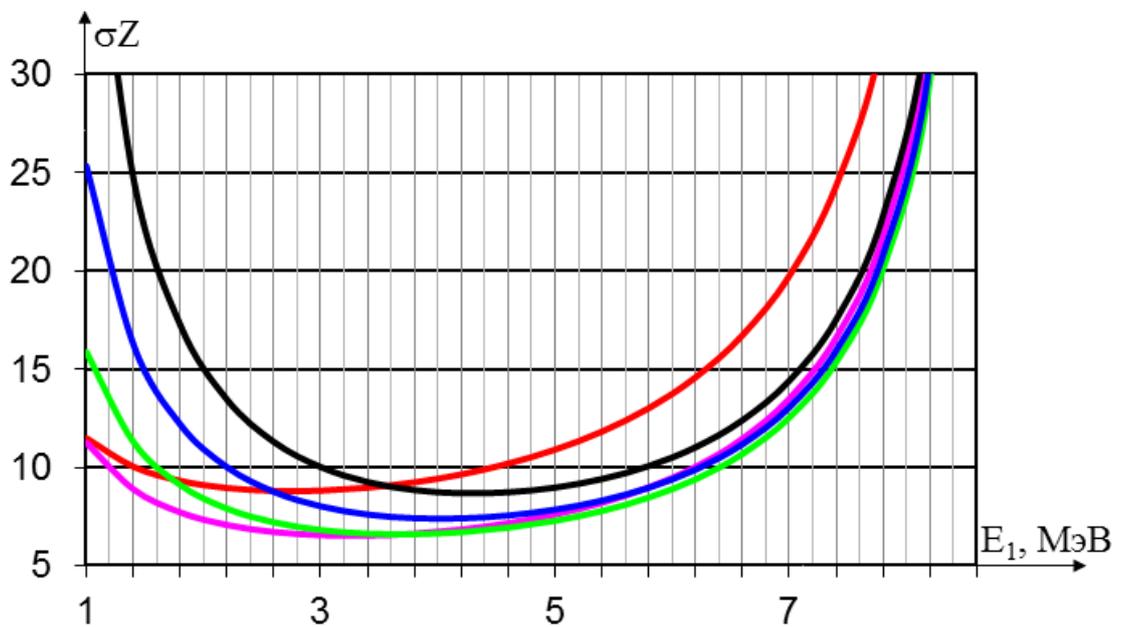


Рисунок 4.4 – Зависимости  $\sigma Z(E_1)$  для алюминия,  $E_2=9$  МэВ:

- $\rho_H=20$  г/см<sup>2</sup>; —  $\rho_H=80$  г/см<sup>2</sup>;
- $\rho_H=40$  г/см<sup>2</sup>; —  $\rho_H=100$  г/см<sup>2</sup>;
- $\rho_H=60$  г/см<sup>2</sup>

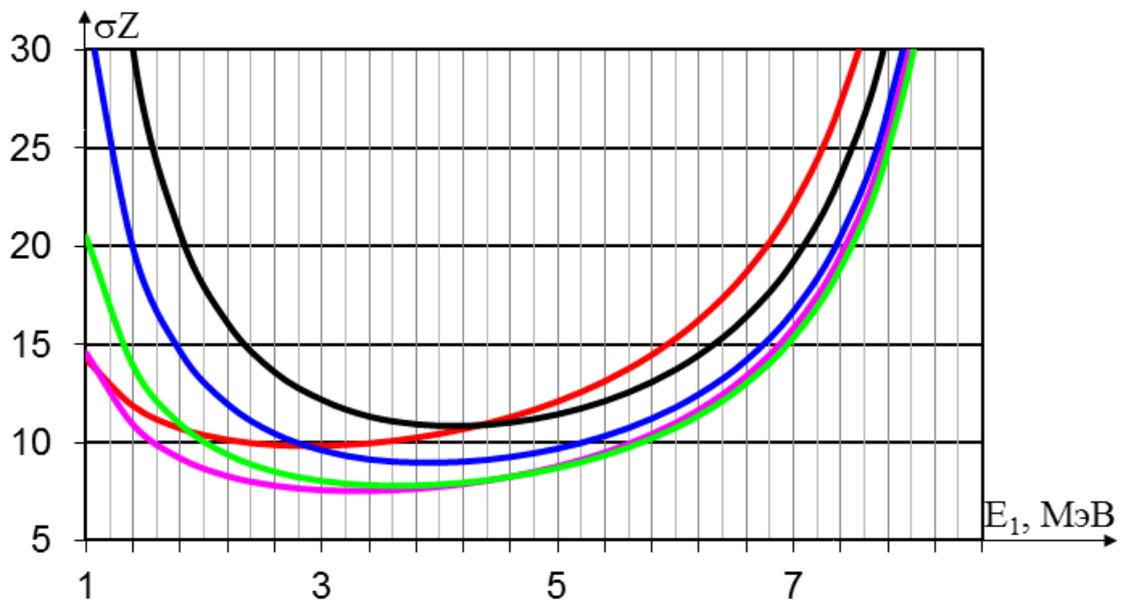


Рисунок 4.5 – Зависимости  $\sigma_Z(E_1)$  для стали,  $E_2=9$  МэВ:

- $\rho_H=20$  г/см<sup>2</sup>; —  $\rho_H=80$  г/см<sup>2</sup>;
- $\rho_H=40$  г/см<sup>2</sup>; —  $\rho_H=100$  г/см<sup>2</sup>;
- $\rho_H=60$  г/см<sup>2</sup>

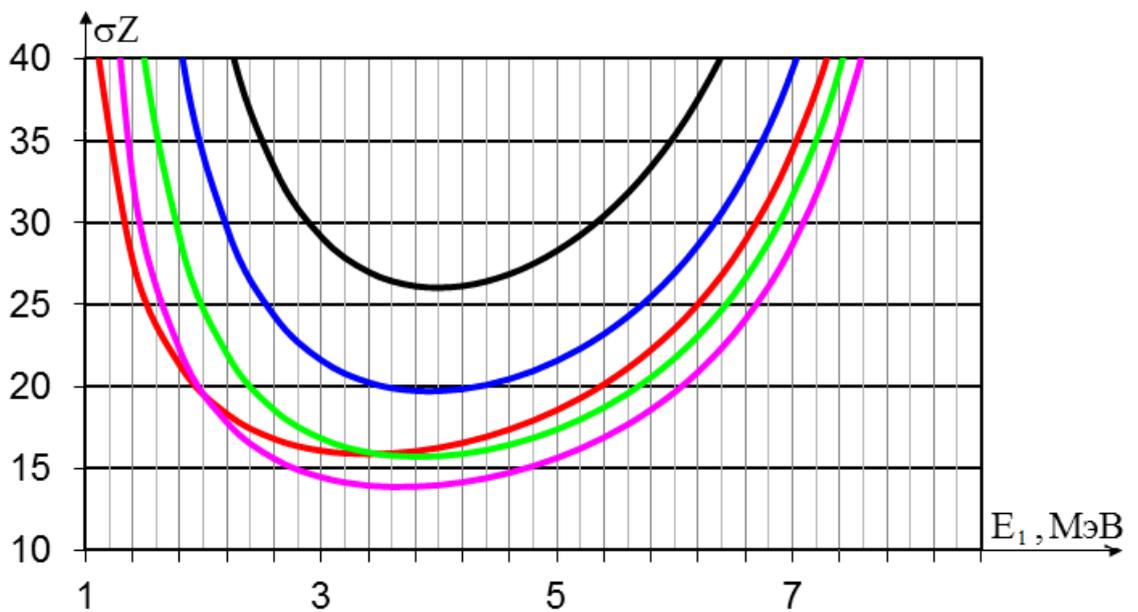


Рисунок 4.6 – Зависимости  $\sigma_Z(E_1)$  для свинца,  $E_2=9$  МэВ:

- $\rho_H=20$  г/см<sup>2</sup>; —  $\rho_H=80$  г/см<sup>2</sup>;
- $\rho_H=40$  г/см<sup>2</sup>; —  $\rho_H=100$  г/см<sup>2</sup>;
- $\rho_H=60$  г/см<sup>2</sup>

## **Основные результаты**

Выведены совокупности математических соотношений, которые позволяют оценить погрешность определения идентификационных параметров для двух способов реализации метода дуальных энергий – идентификации по эффективному атомному номеру и идентификации по методу линий уровней.

Для проверки достоверности математических соотношений был проведён пример расчёта погрешности определения идентификационных параметров применительно к инспекционному досмотровому комплексу Томского политехнического университета на базе малогабаритного бетатрона МИБ–4/9.

В результате сравнения теоретических и экспериментальных данных доказана работоспособность предлагаемых алгоритмов оценки качества радиографических систем с функцией идентификации веществ объектов контроля и их фрагментов.

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

## 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 5.1 Предпроектный анализ

#### 5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для того чтобы узнать потенциальных потребителей результатов исследования необходимо проанализировать целевой рынок и выполнить его сегментирование.

**Целевой рынок** – подразумевает под собой сегменты рынка, на котором будет осуществляться продажа разработки в будущем. В свою очередь, сегментом рынка является выделенная особым образом часть рынка, а также группы потребителей, которые обладают общими определенными признаками.

Целевым рынком является ниша, осуществляющая таможенный контроль грузов и машин.

**Сегментирование** – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Сегментом рынка является инспекционный досмотровый контроль крупногабаритных грузов и машин. Карта сегментирования рынка услуг по разработке представлена в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Карта сегментирования рынка услуг по разработке

Место проведения таможенного контроля	Виды досмотрового контроля	
	Без вскрытия груза	С вскрытием груза
Границы государств	А	А,Б
Морской порт	–	Б
Аэропорт	А,Б	–
Железнодорожный вокзал	–	Б

Таможенные службы А – проводят досмотровый контроль с применением инспекционных досмотровых комплексов с функцией идентификации веществ объектов контроля

Таможенные службы Б – проводят досмотровый контроль с применением индикационных систем, при помощи визуального осмотра, при помощи поисковых специально обученных животных.

В приведенной выше карте сегментирования показано, что таможенный контроль с применением инспекционных досмотровых комплексов с функцией идентификации веществ объектов контроля нашел свое применение на границах государств и в аэропортах. Поэтому совершенствование комплекса, для дальнейшего его внедрения во все указанные выше места, необходимо для предотвращения незаконной экономической деятельности и предотвращения террористических актов на ранней стадии.

### **5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Данный анализ необходим для того чтобы детально оценить предполагаемые конкурирующие разработки, которые уже существуют на рынке, внести коррективы и усовершенствовать разработанные комплексы для успешного обеспечения конкуренции.

Анализ конкурирующих разработок с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

По пятибалльной шкале экспертным путем необходимо оценить по каждому показателю позиции разработки и конкурентоспособности, где 5 – наиболее сильная, а 1 – наиболее слабая позиция.

Для составления оценочной карты сравнения конкурентных технических решений были выбраны следующие существующие на данный момент и конкурирующие между собой технические решения:

- 1 – мобильный инспекционный досмотровый комплекс;
- 2 – стационарный инспекционный досмотровый комплекс;

3 – перебазируемый инспекционный досмотровый комплекс.

Анализ конкурентоспособности технических решений определялся по формуле 1:

$$K = \sum V_j B_j, \quad (5.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки;

$V_j$  – вес показателя;

$B_j$  – балл показателя.

Оценочная карта приведена в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>1</sub>	Б <sub>2</sub>	Б <sub>3</sub>	К <sub>1</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Энергоэффективность	0,04	3	4	2	0,12	0,16	0,08
2. Надежность	0,2	3	4	3	0,6	0,8	0,6
3. Унифицированность	0,02	2	3	3	0,04	0,06	0,06
4. Безопасность	0,1	3	3	3	0,3	0,3	0,3
5. Потребность в ресурсах памяти	0,02	4	3	4	0,08	0,06	0,08
6. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,03	3	4	3	0,09	0,12	0,09
7. Простота эксплуатации	0,1	3	3	3	0,3	0,3	0,3
8. Ремонтпригодность	0,03	2	3	2	0,06	0,09	0,06
9. Помехоустойчивость	0,03	2	4	3	0,06	0,12	0,09
10. Чувствительность	0,1	3	4	4	0,3	0,4	0,4
11. Достоверность	0,1	3	4	4	0,3	0,4	0,4
12. Производительность	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
13. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
14. Конкурентоспособность продукта	0,01	3	3	3	0,03	0,03	0,03
15. Цена	0,04	2	2	2	0,08	0,08	0,08
16. Послепродажное обслуживание	0,01	3	3	3	0,03	0,03	0,03
17. Финансовая эффективность научной разработки	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
18. Предполагаемый срок эксплуатации	0,03	2	3	2	0,06	0,09	0,06
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>51</b>	<b>59</b>	<b>53</b>	<b>2,97</b>	<b>3,46</b>	<b>3,08</b>

## SWOT–анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – комплексный анализ научно–исследовательского проекта, применяемый для анализа внутренней и внешней среды проекта, состоящий из нескольких этапов.

Первый этап – включает в себя описание слабых и сильных сторон проекта, установление возможностей и угроз, необходимых для реализации проекта, которые появились или могут появиться в его внешней среде. Первый этап SWOT – анализа представлен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Комплексный анализ научно–исследовательского проекта

Характеристика	Описание
Сильные стороны	С1. Обладает повышенной помехоустойчивостью. С2. Не требует большого количества обслуживающего персонала. С3. Более ремонтпригоден и энергоэффективен по сравнению с конкурентами
Слабые стороны	Сл1. Требуется улучшения обработки полученных изображений. Сл2. Требуется технических доработок Сл3. Необходимо упрощение интерфейса управления комплексом
Возможности	В1. Комплекс осуществляет идентификацию веществ. В2. Предотвращает на ранней стадии террористические акты. В3. Позволяет без вскрытия груза обнаружить контрабанду денежных средств, драгоценных металлов и наркотических средств.
Угрозы	У1. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства. У2. Трудность реализации установки. У3. Конкуренты постоянно совершенствуют имеющиеся технологии, что может вывести их установки на более высокий уровень.

Второй этап – выявление соответствия сильных и слабых сторон научно–исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Каждый фактор помечен либо знаком «+» (сильное соответствие сильных

сторон возможностям), либо знаком «→» (слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «→». В рамках данного этапа построена интерактивная матрица проекта, приведенная в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны			Слабые стороны		
		С1	С2	С3	Сл1	Сл2	Сл3
Возможности проекта	В1	+	+	+	+	–	–
	В2	+	+	+	+	–	+
	В3	+	+	–	+	0	0
Угрозы проекта	У1	–	+	+	+	+	+
	У2	0	–	+	+	+	–
	У3	0	–	–	+	–	+

Данная матрица помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей SWOT-анализа, выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Третий этап – подразумевает под собой составление итоговой матрицы SWOT – анализа. Результаты данного этапа представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – SWOT – анализ

	Сильные стороны	Слабые стороны
Возможности проекта	Благодаря внедрению комплекса в таможенные службы стран можно с уверенностью гарантировать снижения уровня угроз терроризма и контрабанды.	Требуется усовершенствование комплекса на программном уровне для повышения производительности контроля, качества полученных изображений, чувствительности контроля.
Угрозы проекта	Несвоевременное финансовое обеспечение научного проекта ведет к приостановке исследования	Несвоевременное финансирование проекта ведет к приостановке модернизации установки, и как следствие приостановке разработки метода.

## 5.2 Инициация проекта

Целью проекта является разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик, внесение предложений по улучшению технической составляющей высокоэнергетических инспекционных досмотровых комплексов. Ожидаемые результаты проекта – расширение функциональных возможностей комплекса, увеличение производительности досмотрового контроля, улучшение качества полученных цифровых изображений. Заинтересованные стороны проекта представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Лаборатория технической томографии и интроскопии №40 ИНК ТПУ	Разработка методики досмотрового контроля при помощи инспекционного досмотрового комплекса и оптимизировать выбор параметров и характеристик контроля.
PowerScan Limited (Пекин, КНР)	

## Организационная структура проекта

Организационная структура проекта раскрывает состав рабочей группы данного проекта, позволяет в полной мере оценить роль всех участников в проекте, а также прописать функции, которые выполнялись каждым из участников и величину трудозатрат в проекте. Организационная структура показывает рабочую группу данного проекта, роль каждого участника, а также функции, выполняемые участниками, их трудозатраты в проекте. Рабочая группа проекта представлена в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Организационная структура проекта

Ф.И.О., должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
Струговцов Д.В., магистрант	Исполнитель	Выполнение запланированных по проекту работ	930
Осипов С.П., к.т.н., в.н.с. лаб.№40 ИНК ТПУ	Руководитель	Консультирование	270
Итого			1200

## **5.3 Планирование управления научно–техническим проектом**

### **5.3.1 План проекта**

Планирование работ представляет собой графическое представление определенного комплекса работ с помощью сетевых или линейных методов, которые дают представление о последовательности, взаимосвязи и длительности конкретных работ. Поскольку данная работа имеет малый штат исполнителей и проводится с малыми затратами, целесообразно применить систему линейного планирования с построением линейного графика.

Планирование научно–исследовательской работы заключается в составлении перечня работ, необходимых для достижения поставленной цели, определение сроков их выполнения, а также исполнителей, с последующим построением линейного графика проведения научных исследований.

В разработке методики проведения цифрового радиографического контроля принимали участие следующие исполнители:

1. Научный руководитель
2. Магистрант

Работа включала в себя три основных этапа: подготовительный, основной и заключительный. Основной этап содержит работы по разработке будущей методики, ее созданию, а также внедрению. Подробный перечень этапов, работ и распределение исполнителей приведен в таблице 5.8.

Трудоемкость разработки у исполнителя составила 216 дней, у руководителя – 112 дней.

Диаграмма Ганта, используется для наглядности линейного календарного плана проекта, в котором все проектные работы представлены протяженными во времени отрезками, которые характеризуются датами начала и окончания выполнения работ по проекту представлена в приложении Б.

Таблица 5.8 – Перечень этапов, работ и исполнителей научно-исследовательской работы

Наименование работ	Срок выполнения	Длительность, дни	Участники
Принятие решения о разработке, постановка цели и задач.	02.11.2014	4	Руководитель, Исполнитель
Составление и утверждение технического задания.	10.11.2014	18	Руководитель
Анализ научно-технической документации, патентный обзор, литературный обзор	01.12.2014	24	Исполнитель
Изучение принципа работы досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ	10.01.2015	28	Исполнитель
Получение навыков работы на экспериментальном досмотровом комплексе	10.03.2015	16	Исполнитель
Анализ математической модели формирования конечных изображений	08.04.2015	10	Руководитель, Исполнитель
Разработка алгоритма оценки производительности комплекса и его реализация	20.05.2015	32	Руководитель, Исполнитель
Проведение теоретического и экспериментального анализа исходных и идентификационных изображений (коррекция шума)	14.09.2015	22	Руководитель, Исполнитель
Разработка рекомендаций по выбору параметров и характеристик комплекса	05.10.2015	18	Руководитель, Исполнитель
Анализ полученных данных и корректировка алгоритмов	17.11.2015	14	Руководитель, Исполнитель
Написание диссертации	20.03.2016	50	Исполнитель

### 5.3.2 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;

- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

В таблице 5.9 приведена информация о затратах на покупку всех видов материалов, комплектующих и полуфабрикатов, необходимых для проведения исследований с указанием потребного количества, цены за единицу и общей суммы.

Таблица 5.9 – Материалы необходимые для проведения исследований

Наименование	Размерность	Кол– во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Шариковая ручка	шт	2	56	112
Бумага формата А4	уп	1	240	240
Всего за материалы				352
Транспортно–заготовительные расходы (3–5%)				17,6
Итого по статье $C_m$				369,6

### **Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ**

В таблицу 5.10 сведена информация о затратах, связанных с приобретением, изготовлением, арендой специального оборудования, необходимого для проведения экспериментальных работ, а также об амортизационных отчислениях специальных приборов и устройств, имеющихся в научно–технической организации, занимающейся проектом.

При выполнении экспериментальных работ по данному проекту использовалось имеющееся в научно–технической организации оборудование. Начисление амортизации выполняется только на оборудование стоимостью более 100 000 рублей.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НИИ и имеющегося в данной научно–технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации, исполнения темы, сведено в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Расчет затрат на спецоборудование для научных работ

Наименование оборудования	Кол–во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
Инспекционный досмотровый комплекс (бетатрон, линейка детекторов, кабели питания, коллиматор, программное обеспечение)	1	15000000	17250000
Персональный компьютер	1	110000	126500
Лебедка	1	300000	345000
Экспериментальный стенд с механическим приводом	1	200000	230000
Итого	4	15610000	17951500

#### **Расчет основной и дополнительной заработной платы, отчислений на социальные нужды и накладные расходы**

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Основная заработная плата включает в себя премию, выплачиваемую

ежемесячно из фонда заработной платы. Расчет основной заработной платы сведен в таблицу 5.11.

Таблица 5.11 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Исполнители по категориям	Должность	Трудо–емкость, чел.–дн.	Зарботная плата, приходящаяся на один чел.–дн., руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб.
1	Руководитель	в.н.с., к.т.н.	112	1521,30	23718,51
2	Исполнитель	м.н.с	216	634,58	9893,56

Основная заработная плата работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (5.2)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (5.3)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно–техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (5.4)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 рабочих дня  $M = 11,2$  месяца, 5–дневная неделя; при отпуске в 48 рабочих дней  $M = 10,4$  месяца, 6–дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно–технического персонала, раб. дн. (при 5–дневной рабочей недели составляет 227 дней, при 6–дневной – 247 дней).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot (k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (5.5)$$

где  $Z_b$  – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы с учетом коэффициентов за весь проектный период сведен в таблицу 5.12.

Таблица 5.12 – Расчет основной заработной платы с учетом коэффициентов за весь проектный период

Исполнители	$Z_b$ , руб.	$k_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	23718,51	1,3	30834,10	1521,30	112	170385,60
Исполнитель	9893,56	1,3	12861,63	634,58	216	137069,30
Итого						307454,90

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10 – 15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле 7:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (5.6)$$

где  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{осн}$  – основная заработная плата, руб.

Коэффициент дополнительной заработной платы  $k_{доп} = 0,15$ , который исходит из 15% от основной заработной платы. В таблице 5.13 приведена величина основной и дополнительной заработной платы за весь проектный период.

Таблица 5.13 – Заработная плата исполнителей за весь проектный период

Заработная плата за проектный период	Руководитель	Исполнитель
Основная зарплата, руб.	170385,60	137069,30
Дополнительная зарплата, руб.	25557,85	20560,40
Зарплата, руб.	195943,45	157629,70
Итого по статье $C_{зп}$	353573,15	

Отчисления во внебюджетные фонды рассчитывается по формуле:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (5.7)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (составляет 22% – пенсионный фонд РФ, 2,9% – фонд социального страхования РФ, 5,1% – федеральный фонд обязательного медицинского страхования РФ)

$$C_{внеб} = 0,3 \cdot 353573,15 = 106071,95 \text{ руб.}$$

Накладные расходы включают в себя затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Накладные расходы составляют 80 – 100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (5.8)$$

где  $k_{накл}$  – коэффициент накладных расходов.

$$C_{накл} = 0,8 \cdot 353573,15 = 282858,52 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по статьям затрат составлена калькуляция плановой себестоимости научно–технического исследования (таблица 5.14).

Таблица 5.14 – Группировка затрат по статьям

<b>Наименование статьи</b>	<b>Сумма, руб.</b>
Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты	369,6
Специальное оборудование для экспериментальных работ	17951500
Основная заработная плата	307454,90
Дополнительная заработная плата	46118,25
Отчисления на социальные нужды	106071,95
Накладные расходы	282858,52
<b>Итого плановая себестоимость</b>	<b>18694373,22</b>

### 5.3.3 Проектная организационная структура научного исследования

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур, таких как функциональная, проектная и матричная. После анализа критериев выбора для данного научного исследования была выбрана проектная организационная структура (рисунок 5.1).

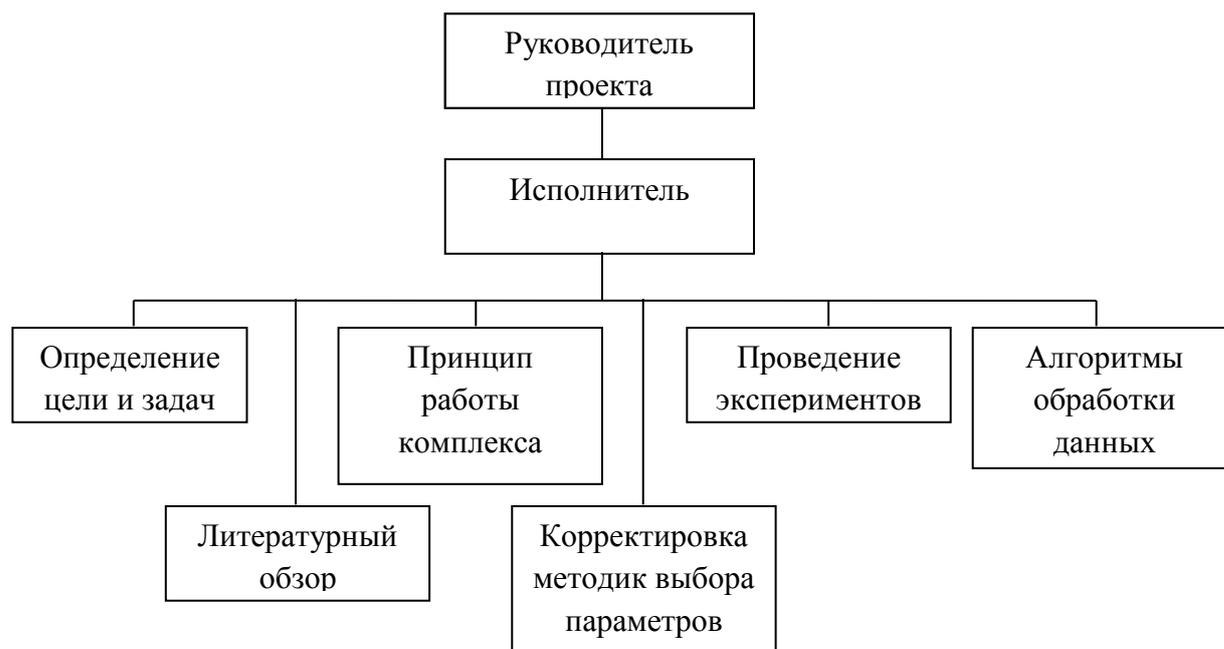


Рисунок 5.1 – Проектная структура научного исследования

## Реестр рисков проекта

Риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

При рассмотрении рисков проекта уровень риска (высокий, средний, низкий) зависит от вероятного его наступления и степени влияния на проект. Риски с высокой степенью влияния и наибольшей вероятностью наступления относятся к рискам высокого уровня, риски с низкой степенью влияния и наименьшей вероятностью наступления – к рискам низкого уровня

Реестр рисков по данному проекту представлен в таблице 5.15.

Таблица 5.15 – Реестр рисков по проекту

Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1–5)	Влияние риска (1–5)	Уровень риска	Способы смягчения	Условия наступления
Внеплановое отключение электроэнергии	Несохранение экспериментальных данных	1	3	средний	Автосохранение получаемых данных	Чрезвычайная ситуация
Неисправность оборудования	Невозможность проведения исследований	2	5	высокий	Наличие запасных деталей для незамедлительного ремонта	Несвоевременный мониторинг оборудования
Отсутствие финансирования	Срыв графика исследований	3	5	высокий	Наличия запаса необходимых материалов	Подвижность рыночной конъюнктуры
Заболевание исполнителя	Срыв графика исследований	2	4	Высокий	Планирование работ с запасом времени по графику	Своевременная профилактика заболеваний
Отсутствие информативности в полученных данных	Срыв графика исследований	2	4	высокий	Возможность использования полученных данных в других разработках	Некорректно поставленные задачи исследования

## 5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его

нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

**Интегральный показатель финансовой эффективности** научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (таблица 5.16). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

**Интегральный финансовый показатель** разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (5.9)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{ri}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Исполнение 1 – мобильный инспекционный досмотровый комплекс (16229180 – стоимость исполнения);

Исполнение 2 – стационарный инспекционный досмотровый комплекс (18694373 руб. – стоимость исполнения);

Исполнение 3 – перебазированный инспекционный досмотровый комплекс (20543267 руб. – стоимость исполнения)

Таблица 5.16 – Расчет интегрального финансового показателя разработки

Вариант исполнения	$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$
Исполнение 1	0,79
Исполнение 2	0,91
Исполнение 3	1

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

**Интегральный показатель ресурсоэффективности** вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^p \quad (5.10)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 5.17).

Таблица 5.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	И1	И2	И3	Интегральный показатель ресурсоэффективности $I_{p-исп}$		
					И1	И2	И3
1. Производительность	0,25	5	4	4	1,25	1	1
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	5	3	0,4	0,5	0,3
3. Помехоустойчивость	0,2	3	5	4	0,6	1	0,8
4. Безопасность	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
5. Надежность	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4
6. Чувствительность	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5
7. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,05	3	5	4	0,15	0,25	0,2
8. Простота эксплуатации	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,15
9. Ремонтопригодность	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,15
ИТОГО	1				3,9	4,55	4,0

**Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки** ( $I_{исп.}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}^{исп.1}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр}^{исп.2}} \text{ и т.д.}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 5.18) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (5.11)$$

Таблица 5.8 – Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Исп.1		Исп.2		Исп.3	
Интегральный финансовый показатель разработки	0,79		0,91		1	
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,9		4,55		4,0	
Интегральный показатель эффективности	4,936		5,219		4,550	
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	$\frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}$	0,987	$\frac{I_{исп.2}}{I_{исп.1}}$	1,012	$\frac{I_{исп.3}}{I_{исп.1}}$	0,921
	$\frac{I_{исп.1}}{I_{исп.3}}$	1,084	$\frac{I_{исп.2}}{I_{исп.3}}$	1,098	$\frac{I_{исп.3}}{I_{исп.2}}$	0,910

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Таким вариантом является исполнение № 2.

## **6 Социальная ответственность**

### **6.1 Введение**

Охрана труда рабочих и инженерно–технического персонала на предприятиях предусматривает выполнение ряда требований, предписываемых общепринятыми и специальными правилами. Проведение мероприятий по охране труда обеспечивает улучшение условий труда и повышение его производительности в соответствии с нормами производственной санитарии, техники безопасности и охраны окружающей среды.

При выполнении работ по досмотровому контролю используется современный комплекс для инспекционного досмотрового контроля крупногабаритных грузов и машин. В основу работы данного комплекса положен принцип получения цифрового радиографического изображения, посредством прохождения через объект контроля высокоэнергетического рентгеновского излучения, благодаря которому можно наблюдать содержимое объекта контроля не проводя его вскрытие.

Инспекционные досмотровые комплексы получили свое применение в сфере таможенного контроля. Данный комплекс помогает предотвратить контрабанду оружия, наркотиков, денежных средств, драгоценных металлов и других веществ.

Согласно СанПиН 2.2.4.548–96 [43] выполняемые работы относились к классу тяжести IIa. Рабочей зоной являлся лабораторный корпус, в котором находились источник рентгеновского излучения (бетатрон), линейка детекторов и объект контроля. Рабочее место – помещение, в котором находился персональный компьютер подключенные в сеть 220 В, пульт управления источником ионизирующего излучения, пульт управления механическим приводом.

Целью раздела является создание таких условий, которые бы обеспечивали безопасность работников, общества и окружающей среды в

процессе проведения досмотрового контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ.

Основной задачей раздела является разработка комплекса мероприятий технического, организационного, режимного и правового характера, которые бы минимизировали негативные последствия в процессе проведения досмотрового контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ.

## **6.2 Производственные безопасность**

Производственная санитария – система организационных мероприятий и технических средств, которые предотвращают или уменьшают воздействие вредных и опасных производственных факторов на работающих. К производственной санитарии относится: гигиена труда (область медицины, изучающая условия сохранения здоровья на производстве) и санитарная техника (мероприятия и устройства технического характера, относящиеся к производственной санитарии – микроклимат, шумы и вибрации, освещенность, напряженность электромагнитного поля, а также комплекс требований при работе с вредными химическими веществами и ионизирующим излучением).

Как было отмечено выше, согласно СанПиН 2.2.4.548–96[43] выполняемые работы относились к Па классу тяжести, т.е. работы, которые связаны с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие незначительного физического напряжения. Энергозатраты находятся в интервале от 175 до 232 Вт.

Согласно ГОСТ 12.0.003–74. [44] ССБТ опасные и вредные производственные факторы по природе происхождения принято разделять на химические, физические, психофизиологические и биологические.

В процессе проведения досмотрового контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ рассматривались опасные и производственные факторы, которые оказывали физическое и психофизиологическое воздействие. Факторы характерные для производственной среды, в которой проводились проектные работы, сведены в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Опасные и вредные факторы при проведении проектных исследований

Источник фактора	Факторы		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1.ПК 2.Лабораторная установка для проведения исследований	1. Отклонение показателей микроклимата от нормальных 2. Недостаточная освещенность рабочей зоны 3. Повышенный уровень ионизирующего излучения 4. Повышенный уровень электромагнитных излучений 5. Перенапряжение анализаторов (зрение)	Электрический ток	СанПиН 2.2.4.548–96 [43] СНиП 23–05–95* СП 52.13330.2011[45] ГОСТ Р 12.1.019–2009 [46] ГОСТ 12.1.030–81 [47] НРБ–99/2009[48] ГОСТ Р 50923–96[49] 123–ФЗ от 22 июля 2008 г [50]

### **Отклонение показателей микроклимата от нормальных**

Для формирования благоприятных рабочих условий, которые соответствуют физиологическим потребностям организма, существующие санитарные правила и нормы устанавливают допустимые и оптимальные метеорологические условия в рабочей зоне помещения.

В соответствии с СанПиН 2.2.4.548–96[43] устанавливаются оптимальные нормы параметров микроклимата в зависимости от периода года

и категории выполняемых работ по уровням энергозатрат, которые представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548–96)

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Температура воздуха, С°	Температура поверхностей, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	IIa (175–232)	19–21	18–22	60–40	0,2
Теплый	IIa (175–232)	20–22	19–23		

### **Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Освещение – процесс получения, распределения и использования световой энергии, обеспечивающий благоприятные условия видения объектов и предметов. Освещенность рабочего места влияет на самочувствие и настроение человека, определяет эффективность его труда.

Использование рационального освещения помещений и рабочих мест, является одним из важнейших условий создания безопасных и благоприятных условий труда.

В процессе проведения досмотрового контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ в помещении использовалось только искусственное освещение. Нерациональное освещение может стать одной из причин травматизма: слепящие источники света и блики от них, плохо освещенные опасные зоны, резкие тени ухудшают видимость настолько, что могут вызвать полную потерю ориентации работающих. Как следствие, при неудовлетворительном уровне освещения резко снижается производительность труда, точность и правильность проведения процедуры досмотрового контроля. Правильно организованное и спроектированное освещение повышает возможность нормальной производственной деятельности.

Согласно СНиП 23–05–95\* (СП 52.13330.2011) [45] все зрительные работы подразделяются на 8 разрядов в зависимости от условий зрительной работы и размера объекта различения. В процессе проведения досмотрового

контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ производились зрительные работы, относящиеся к 2 разряду – очень высокая точность; наименьший размер объекта 0,15–0,30; подразряд работы – в; контраст объекта различения с фоном – средний; характеристика фона – средний; значение комбинированного освещения 1500 лк.

### **Повышенный уровень ионизирующего излучения**

Источники ионизирующего излучений широко применяются в технике, атомной энергетике, медицине, химии, сельском хозяйстве и т. п. При работе с источниками ионизирующих излучений и радиоактивными веществами возникает потенциальная угроза для здоровья и жизни людей.

Источник ионизирующего излучения – система, содержащая техническое устройство или радиоактивный материал, которое в процессе своей работы способно испускать ионизирующее излучение (рентгеновские аппараты, ускорители частиц, радиоактивные изотопы).

При выполнении данной работы в качестве источника излучения использовался бетатрон МИБ 4,5/9 МэВ.

Выделяют два вида ионизирующего излучения излучений:

- электромагнитное: гамма ( $\gamma$ )–излучение и рентгеновское.
- корпускулярное: альфа ( $\alpha$ )– и бета ( $\beta$ )–излучения, нейтронное излучение и др.;

Рассмотрим основные характеристики и параметры, применяемые для анализа ионизирующих излучений.

*Доза излучения* – переданное ионизирующим излучением веществу и поглощенное этим веществом количество энергии. Это величина, характеризует воздействие ионизирующего излучения на вещество.

*Экспозиционная доза  $X$*  предназначена для количественной характеристики только  $\gamma$ –излучения и рентгеновского. Экспозиционная доза равна отношению полного электрического заряда  $dQ$  ионов одного знака, которые возникают в малом объёме воздуха, к массе воздуха  $dm$  в этом объёме

$$X = dQ/dm.$$

Единицей экспозиционной дозы является кулон на килограмм (Кл/кг).  
Внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р).

*Поглощенная доза излучения D* – это поглощенное единицей массы облучаемого тела количество энергии ионизирующего излучения. Поглощенная доза определяется отношением средней энергии  $dE$ , которая передана ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе этого вещества  $dm$ :

$$D = dE/dm.$$

Единицей измерения поглощенной дозы является грей (Гр).

Одинаковое количество поглощенной дозы различных видов излучения вызывает в организме различные биологические действия. Для учета влияния на человека различных видов излучения на различные органы вводят понятия «эквивалентная» и «эффективная» доза.

*Эквивалентная доза H* служит для оценки радиационной опасности облучения человека от разных видов излучения. Эта величина определяется как произведение средней поглощенной дозы  $D_{T,R}$  излучения вида R в органе или ткани T на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного излучения  $W_R$ :

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}.$$

Единицей измерения эквивалентной дозы является Дж/кг, получивший название зиверт (Зв). Внесистемной единицей служит бэр (биологический эквивалент рада); 1 Зв=100 бэр.

Значения  $W_R$  для  $\alpha$ -частиц, осколков деления, тяжелых ядер – 20, для фотонов, электронов составляет 1.

*Эффективная доза E* – величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органе (ткани)  $H_{i,T}$  за время t на

соответствующий взвешивающий коэффициент для данного органа или ткани  $W_T$ :

$$E = \sum H_{i,T} \cdot W_T.$$

Единица измерения эффективной дозы – зиверт.

Согласно НРБ–99/2009 существует 2 категории облучаемых лиц:

- персонал – лица, непосредственно работающие с техногенными источниками (группа А) и лица, которые находятся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б)
- население (все население, а также лица из персонала, вне сферы их производственной деятельности).

Допустимые значения эффективных доз для указанных категорий облучаемых лиц приведены в таблице 6.3.

Воздействие ионизирующего излучения на человека носит сложный характер. Во время однократного равномерного облучения всего тела дозой 0,5 Зв детерминированные эффекты практически не наблюдаются, т. е. их нельзя обнаружить современными методами. Значения дозовых порогов для некоторых детерминированных эффектов облучения приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.3 – Допустимые пределы эффективных доз для категорий

Нормируемые величины	Пределы дозы		
	Персонал (группа А)	Персонал (группа Б)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет. но не более 50 мЗв в год	5 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет. но не более 12,5 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет. но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год:			
в хрусталике глаза	150 мЗв	37,5 мЗв	15 мЗв
коже	500 мЗв	125 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	125 мЗв	50 мЗв

Таблица 6.4 –Дозовые пороги возникновения некоторых детерминированных эффектов облучения

Состояние	Дозовые пороги	
	при кратковременном облучении, Зв	при хроническом многолетнем облучении, Зв/год
Легкое угнетение кроветворения (легкая лейкоцитопения нарушение)	0,15	0,40
Временная стерильность мужчин	0,15	0,40
Постоянная стерильность мужчин	3,5—6,00	2,00
Постоянная стерильность женщин	2,5–6,00	0,2 (до суммарной дозы > 6,00 Зв)
Помутнение хрусталика глаза с ухудшением зрения (катаракта)	5,00	0,15 (до суммарной дозы > 8,00 Зв)

При защите от внешнего облучения, возникающего при работе с источниками излучения, основные усилия должны быть направлены на предупреждение переоблучения персонала. Для этого используются следующие методы:

- защита расстоянием;
- защита временем;
- защита количеством;
- защита экранами.

Немаловажным критерием оценки системы радиационной безопасности является дозиметрический контроль за уровнями внутреннего и внешнего облучения персонала, а также за уровнем радиации в окружающей среде.

Средства индивидуальной защиты, которые используются при работе с закрытыми источниками, делятся на пять видов: спецобувь, дополнительные защитные приспособления, спецодежда, изолирующие костюмы, средства защиты органов дыхания.

Помещения, предназначенные для работы с радиоактивными веществами источниками излучения, должны быть изолированы от других помещений и специально оборудованы в зависимости от класса работ, определяемого активностью этих радиоактивных веществ.

## **Повышенный уровень электромагнитных излучений**

Нормирование ЭМП промышленной частоты осуществляют в соответствии с ГОСТ 12.1.002–84. Стандарт устанавливает предельно допустимые уровни напряженности электрического поля частотой 50 Гц в зависимости от времени пребывания в нем. Присутствие персонала на рабочем месте в течение 8 ч допускается при напряженности, не превышающей 5 кВ/м.

Допустимое время пребывания (ч) в электрическом поле напряженностью от 5 до 20 кВ/м включительно вычисляется по формуле

$$T=(50/E)-2$$

где E – напряженность воздействующего электрического поля в контролирующей зоне, кВ/м.

Работа в условиях облучения электрическим полем с напряженностью 20÷25 кВ/м продолжается не более 10 мин. Предельно допустимый уровень напряженности электрического поля устанавливается равным 25 кВ/м. Пребывание в электрическом поле напряженностью более 25 кВ/м без применения средств защиты не допускается.

К средствам защиты от электрического поля промышленной частоты относятся:

- стационарные и переносные заземленные экранирующие устройства (козырьки, навесы, щиты или перегородки из металлических канатов, прутков, сеток);
- средства индивидуальной защиты (защитный костюм, комбинезон, экранирующий головной убор, специальная обувь); составные элементы индивидуального комплекта объединяются в единую электрическую цепь и через обувь или с помощью специального проводника со струбциной обеспечивают качественное заземление.

## **Защита пользователей компьютерной техники**

Рабочее место пользователя персонального компьютера – место, где работник должен находиться в связи с исполнением своих должностных

обязанностей, предусматривающих использование персонального компьютера.

Использование ЭВМ имеет и положительные, и отрицательные стороны. Обеспечение повышения производительности за счет постоянного совершенствования технологического процесса – это плюс; повышенный уровень нагрузки на работающих, который связан с интенсификацией производственной деятельности и специфическими условиями труда – это минус. Предельно допустимый уровень приведен в таблице 6.5.

ПЭВМ являются источниками широкополостных электромагнитных излучений:

- ультрафиолетового 200–400 нм;
- видимого 400–750 нм;
- ближнего ИК 750–2000 нм;
- радиочастотного диапазона 3кГц;
- электростатических полей.

Таблица 6.5 – Предельно допустимый уровень

Нормируемый параметр	ПДУ
Напряженность электрического поля на расстоянии 50 см от монитора в диапазоне частот: 5 Гц – 2 кГц 2кГц – 400 кГц	25 В/м 2,5 В/м
Плотность потока магнитной индукции на расстоянии 50 см от монитора в диапазоне частот: 5 Гц – 2 кГц 2кГц – 400 кГц	250 нТл 25 нТл
Эквивалентный поверхностный электростатический потенциал экрана монитора	500 В

Предъявляются следующие технические требования к персональным компьютерам на производстве и в лабораторных условиях:

- для электропитания компьютеров должна быть смонтирована отдельная сеть электроснабжения;
- не допускается использование оборудования без подключения к защитному заземлению, если такое подключение предусмотрено конструкцией

оборудования.

- не допускается использование оборудования с открытыми корпусами, если это не является основным режимом работы оборудования.
- электрические розетки системы электропитания должны располагаться таким образом, чтобы кабели электропитания оборудования, расположенного на рабочем месте, не пересекали рабочее место (были направлены от места расположения пользователя).

Режим труда и отдыха при работе с ПЭВМ и ВДТ должен организовываться в зависимости от вида и категории деятельности. Виды деятельности подразделяются на следующие группы:

- группа А – работа по считыванию информации с ВДТ или ПЭВМ с предварительным запросом;
- группа Б – работа по вводу информации;
- группа В – творческая работа в режиме диалога.

Для специалистов, проводящих досмотровый контроль с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ в помещении с персональными компьютерами, продолжительность работы не должна превышать 6 часов в день.

При 12-ти часовой рабочей смене регламентированные перерывы должны устанавливаться в первые 8 часов работы аналогично перерывам при 8-ми часовой рабочей смене, а в течение последних 4 часов работы, независимо от категории и вида работ, каждый час продолжительностью 15 минут.

### **Переутомление анализаторов**

Ранее было установлено, что работы связанные с проведением досмотрового контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ относятся к работам с очень высокой точностью (2 разряд зрительных работ). Как следствие, при работе с полученными радиографическими изображениями необходима предельная концентрация и фокусировка внимания к мелким деталям. Немаловажную роль

в переутомлении анализаторов играет постоянное искусственное освещение, долгая, непрерывная работа на компьютере.

Указанные виды деятельности неизбежно приводят к состоянию, которое влечет за собой так называемый «синдром усталости глаз», который может проявляться следующими симптомами:

- боль в глазах;
- покраснение и раздражение белка;
- сухость и резь, ощущение «песка в глазах»;
- головные боли, повышение артериального и внутриглазного давления;
- невозможность сконцентрировать взгляд на определенном объекте;
- расплывчатость и затуманенность мелких деталей, букв, цифр;
- повышенное слезотечение глазного яблока;

Проявление данных симптомов влечет за собой следующие последствия:

- понижение работоспособности;
- возрастает вероятность пропуска важных деталей;
- рассеянное внимание;
- не сосредоточенность.

Для профилактики необходима правильная организация рабочего места и пространства, регулярно проветривать помещение, контроль за освещением помещения и рабочего места, обязательно чередовать работу и отдых через определенные интервалы времени. При сильной усталости глаз проводить гимнастику для глаз.

### **Электрический ток**

Защитное заземление является одной из наиболее часто встречающихся мер защиты людей от поражения электрическим током. Оно предназначено для снижения до малых величин шагового напряжения и напряжения прикосновения. Защитное заземление это – преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Искусственное

заземляющее устройство состоит из вертикальных электродов и горизонтально расположенной соединительной полосы.

Питающее напряжение в помещении для досмотрового контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ является напряжением равное 220–380 В.

Основными средствами и способами защиты от поражения электрическим током являются:

- недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения;
- защитное заземление, зануление или отключение;
- вывешивание предупреждающих надписей;
- контроль за состоянием изоляции электрических установок.

В помещении для досмотрового контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ применяется защитное заземление, контроль за состоянием изоляции.

### **6.3 Экологическая безопасность. Защита Литосферы**

Защита окружающей среды – это комплексная проблема, требующая усилий всего человечества. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия отходов промышленных предприятий является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам.

Из средств неразрушающего контроля определенным воздействием на окружающую среду обладают бетатроны и детекторы ионизирующего излучения, которые обладают повышенной радиацией.

В целях охраны окружающей среды необходимо данные отходы соответственно утилизировать. Бетатроны сдаются в специальные хранилища, а детекторы ионизирующего излучения либо подвергаются химической переработке, либо также сдаются в хранилище. Утилизировать данные отходы могут только организации, имеющие на это соответствующую лицензию.

## **Организационные мероприятия обеспечения безопасности.**

Помещение для досмотрового контроля с применением инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ состоит из двух основных помещений: помещение для проведения эксперимента, в котором установлен бетатрон и линейка детекторов, помещение для управления установкой и обработки полученных результатов проведенного досмотрового контроля.

Контроль проводится с соблюдением норм указанных в НРБ–99/2009 и Федеральном законе 3–ФЗ «О радиационной безопасности населения».

Помещение для проведения эксперимента представляет собой помещение ангарного типа. Толщина бетонных стен по периметру равна 40 см. Снаружи здания стены дополнительно обшиты стальным профлистом. Вход в помещение осуществляется через железную дверь толщиной 6 мм. На двери расположена табличка «Осторожно! Радиация». Во время проведения эксперимента запрещается покидать операторную, не убедившись в отключении установки. Во втором помещении, для удобства работы, персональный компьютер и пульт управления установкой расположены на одном столе, что позволяет проводить обработку результатов контроля не вставая. Операторная отгорожена от основного помещения бетонной стеной толщиной 15 см, вход в операторную дополнительно усилен защитой из железа. Толщина двери 3 см.

Во время проведения эксперимента необходимо проводились технические перерывы по 10–15 мин каждый час, для снятия физической и моральной нагрузки. После проведения эксперимента рекомендуется отдых, сопровождающийся употреблением пищи. Также рекомендуется выпить стакан молока для уменьшения влияния ионизирующего излучения на организм.

## **6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.**

Одной из наиболее вероятной ЧС может быть пожар. Пожар – это неконтролируемое горение вне очага, наносящее материальный ущерб.

Пожарная безопасность обеспечивается мерами противопожарной профилактики, направленной на исключение возникновения и поддержания условий горения, и включает комплекс мероприятий, необходимых для предупреждения возникновения пожара, ограничение распространения огня, защиты людей и тушения пожара.

В целях снижения пожарной опасности проводятся технические, эксплуатационные, организационные и режимные мероприятия.

Здание, в котором проводились работы, по пожарной безопасности относится к категории В, согласно техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности (123–ФЗ от 22 июля 2008 г.).

Основным источником возгорания в лаборатории могут быть неисправности электрооборудования и электропроводки (короткое замыкание; токовые перегрузки; искрение контактов, возникновение электрической дуги; неосторожное обращение с огнем).

Предотвращение этого обеспечивается соответствующим конструктивным исполнением, эксплуатацией и содержанием электрооборудования.

Технические мероприятия:

- содержание помещения в чистоте, своевременная уборка мусора;
- работа должна проводиться только при исправном электрооборудовании;
- на видном месте должен быть вывешен план эвакуации;
- уходящий из помещения должен проверить выключены ли нагреваемые приборы, электроприборы и отключены ли силовая и осветительная электрическая сеть.

Эксплуатационные мероприятия:

- обеспечение оптимального электрического и теплового режимов работы прибора;
- своевременно производить профилактический осмотр контактных соединений и оборудования в целом;
- пожарный инвентарь и первичные средства пожаротушения должны быть исправны, и находиться на видном месте.

Режимные мероприятия:

- все вновь принимаемые на работу лица обязаны проходить вводный противопожарный инструктаж о соблюдении мер пожарной безопасности;
- с каждым должен быть проведен инструктаж по использованию средств пожаротушения;
- перед началом работы назначается ответственный за пожарную безопасность;

Огнетушители, в зависимости от вида огнегасительного средства находящегося в них, делятся на водные, углекислотные, пенные, хладоновые, порошковые. Огнетушители маркируются буквами, характеризующими вид огнетушителя по разряду, и цифрой, обозначающей его объём в литрах.

Углекислотные огнетушители (ОУ–2А, ОУ–5, ОУ–8) используют для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В и некоторых материалов (рисунок 6.1)

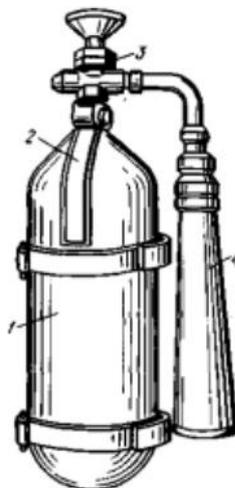


Рисунок 6.1 – Огнетушитель ОУ–2:

1 – баллон; 2 – курок; 3 – вентиль; 4 – раструб

Порошковые огнетушители (ОПС–6, ОПС–10) предназначены для тушения металлов, ЛВЖ, ГЖ, кремнийорганических соединений, установок, работающих под напряжением до 1000 В.

Каждый сотрудник обязан четко знать и выполнять установленные правила пожарной безопасности, не допускать действий, ведущих к возникновению пожарных ситуаций.

В случае, когда не удастся самостоятельно ликвидировать пожар, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь планом эвакуации.

## **6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Устанавливаются следующие основные гигиенические нормативы (допустимые пределы доз) облучения на территории Российской Федерации в результате использования источников ионизирующего излучения:

- для населения средняя годовая эффективная доза равна 0,001 зиверта или эффективная доза за период жизни (70 лет) – 0,07 зиверта; в отдельные годы допустимы большие значения эффективной дозы при условии, что средняя годовая эффективная доза, исчисленная за пять последовательных лет, не превысит 0,001 зиверта;
- для работников средняя годовая эффективная доза равна 0,02 зиверта или эффективная доза за период трудовой деятельности (50 лет) – 1 зиверту; допустимо облучение в годовой эффективной дозе до 0,05 зиверта при условии, что средняя годовая эффективная доза, исчисленная за пять последовательных лет, не превысит 0,02 зиверта.

Молодые люди, не достигшие возраста 18 лет, на вредные или опасные работы не допускаются. Об этом говорится в ст. 265 ТК РФ. Перечень работ, при выполнении которых запрещается применение труда лиц моложе 18 лет, утвержден Постановлением Правительства РФ от 25.02.2000 N 163.

В отношении остальных работников, занятых на работах во вредных и опасных условиях, Трудовым кодексом предусмотрен ряд льгот и компенсаций:

- сокращенная продолжительность рабочего времени (ст. 92);
- ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск (ст. 117);
- оплата труда в повышенном размере (ст. 147);
- проведение за счет работодателя обязательных предварительных при поступлении на работу и периодических медицинских осмотров, а также обязательного психиатрического освидетельствования (ст. 213);
- компенсационные выплаты (ст. 219);
- выдача специальной одежды, специальной обуви, средств индивидуальной защиты, смывающих и обезвреживающих веществ (ст. 221);
- выдача молока и лечебно–профилактического питания (ст. 222).

В трудовых или коллективных договорах не только приводится характеристика условий труда, но и указываются те компенсации, льготы, доплаты и надбавки, которые предприятие обязуется предоставить работнику за работу в тяжелых, вредных или опасных условиях. Такое требование содержится в ст. 57 ТК РФ.

## **Заключение**

На сегодняшний день ИДК являются одним из самых перспективных средств таможенного контроля. Благодаря новейшим техническим разработкам существующие ИДК соответствуют основным потребительским требованиям в полном объеме.

Процесс совершенствования и модернизации ИДК очень трудоемок. Самым перспективным до сих пор направлением улучшения является разработка и внедрение огромного количества программных алгоритмов. Как показывает анализ литературы готовятся к разработке (либо уже единично внедрены) следующие алгоритмы пост обработки изображений:

- создание 3D модели выделенного фрагмента изображения на основе двух теневых изображений;
- алгоритмы уменьшения линейных искажений изображения,
- алгоритмы оценки и выбора параметров для проведения досмотрового контроля (ИНК ТПУ);
- алгоритмы повышения контрастности и резкости изображений;
- алгоритмы уменьшения шумов;
- совершенствование алгоритмов автоматической обработки изображения (поиск, обнаружение и индикация опасных объектов)

Полученные в результате исследований алгоритмы и рекомендации по модернизации технических и физических реализаций досмотрового контроля помогут повысить следующие потребительские показатели:

- уменьшение продолжительности контроля за счет использования источников излучения с энергией выше 7,5 МэВ;
- за счет оценки вероятной погрешности определения эффективного атомного номера вещества возможно более полно и достоверно определить параметры ОК;
- за счет использования новых разновидностей детекторов и более мощных источников излучения возрастает производительность и скорость контроля.

Сформулированы и выведены математические соотношения, предназначенные для оценки погрешности определения параметров идентификации для двух реализаций высокоэнергетического метода дуальных энергий – по эффективному атомному номеру и способом линий уровней.

Проанализированы параметры комплексов, влияющие на точность определения параметров идентификации. Даны методические рекомендации по формированию структуры пакетов импульсов высокоэнергетического рентгеновского излучения.

Проведено сравнение экспериментальных и теоретических оценок погрешности идентификационных параметров фрагментов тестового объекта, которое доказало применимость на практике алгоритма оценки погрешности идентификационных параметров высокоэнергетическим методом дуальных энергий.

Приведена совокупность математических соотношений для оптимального выбора максимальных энергий рентгеновского излучения исходя из критерия минимизации статистической погрешности оценки параметра идентификации методом дуальных энергий.

Инспекционные досмотровые комплексы – относительно новая и молодая тема, которая с каждым годом привлекает к себе все больше и больше внимания. Постоянная модернизация и усовершенствование комплекса являются неотъемлемой частью обеспечения безопасности населения в чрезвычайных ситуациях, связанных с террористическими актами и контрабандными перевозками запрещенных объектов и товаров.

### Список публикаций

1. Osipov S. P. , Chakhlov S. V. , Osipov O. S. , Shteyn A. M. , Strugovtsov D. V. About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015 – Vol. 81, Article number 012082. – p. 1–14
2. Струговцов Д. В. Вихретоковый толщиномер для легкосплавных бурильных труб: описание прибора // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых: в 3 т., Томск, 5–10 Октября 2015. – Томск: ТПУ, 2015 – Т. 1 – С. 209–214
3. Strugovtsov D. V. Regulation of technical standards of digital radiography: literature review // Неразрушающий контроль: сборник трудов V Всероссийской научно–практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 2 т., Томск, 25–29 Мая 2015. – Томск: ТПУ, 2015 – Т. 2 – С. 443–448
4. Струговцов Д. В. Методика оценки производительности инспекционных досмотровых комплексов с функцией идентификации веществ объектов контроля // Качество – стратегия XXI века: сборник научных трудов XIX Всероссийской научно–практической конференции, Томск, 9–12 Декабря 2014. – Томск: ТПУ, 2015 – С. 148–155
5. Струговцов Д. В. Беспленочная радиография труб диаметром более 500 мм // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов III Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. В 4–х томах, Томск, 6–11 Октября 2014. – Томск: ТПУ, 2014 – Т. 1 – С. 228–240
6. Струговцов Д. В. Дефекты бурового оборудования и причины их возникновения // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов III Международной конференции

школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. В 4-х томах, Томск, 6–11 Октября 2014. – Томск: ТПУ, 2014 – Т. 1 – С. 219–223

7. Струговцов Д. В. Неразрушающий контроль технологических трубопроводов нефтегазоперекачивающих станций // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов III Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. В 4-х томах, Томск, 6–11 Октября 2014. – Томск: ТПУ, 2014 – Т. 1 – С. 223–228

8. Strugovtsov D. V. Digital radiography of oil-trunk pipelines using imaging plates [Electronic resorces] // Неразрушающий контроль: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 2 т, Томск, 26–30 Мая 2014. – Томск: ТПУ, 2014 – Т. 2 – С. 273–277. – Mode of access: [http://portal.tpu.ru/files/departments/publish/INK\\_KONFERENTCIIa\\_NERAZRUSH\\_KONTROL%60\\_TOM\\_2.pdf](http://portal.tpu.ru/files/departments/publish/INK_KONFERENTCIIa_NERAZRUSH_KONTROL%60_TOM_2.pdf)

## Список используемой литературы

1. Клюев, В.В. Техническая диагностика – основа безопасности страны/ В.В. Клюев, В.Т. Бобров // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 5. – С. 55–61.
2. Бобров, В.Т. Сессия научного совета по автоматизированным системам диагностики и испытаний РАН по проблемам обеспечения безопасности на транспорте // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 5. – С. 61–67.
3. Park, J.S. Calculation of effective atomic number and normal density using a source weighting method in a dual energy X-ray inspection system/ Park J.S., Kim J.K.. // Journal of the Korean physical society. – 2011. – V. 59. – No. 4. – P. 2709–2713.
4. Ковалев, А.В. Антитеррористическая и криминалистическая диагностика // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 2. – С. 21–29.
5. Лебедев, М.Б. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии/ М.Б. Лебедев, О.А. Сидуленко, В.А. Удод // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 47–55.
6. Арканов А.П. Технические средства антитеррора.– М.: Изд-во Феникс, 2006. – 56 с.
7. Спирин, Д.О. Принципы интроскопии крупногабаритных грузов/ Д.О. Спирин, Я.А. Бердников, Ю.Н. Гавриш // Науч.–техн. ведомости СПбГТУ. – 2010. – № 2. – С. 120–127.
8. Исследование возможности применения малогабаритных бетатронов для идентификации веществ объектов контроля методом дуальных энергий / О.А. Сидуленко, В.А. Касьянов, С.В. Касьянов, С.П. Осипов // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 8. – С. 46–52.
9. Алгоритм автоматического обнаружения включений в объекте контроля с использованием сканирующей системы цифровой рентгенографии (одномерный вариант) / С.Э. Воробейчиков, В.А. Удод, В.А. Клименов, С.А. Щетинкин // Дефектоскопия. – 2014. – № 6. – С. 65–77.
10. Буклей, А.А. Исследования и создание портативной досмотровой

- рентгеновской техники и оборудования НК. Разработка технологии их применения // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 4. – С. 76–80.
11. Клюев, В.В. Современное состояние цифровой рентгенотехники / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин // Дефектоскопия. – 1999. – № 4. – С. 56–66.
  12. Соснин, Ф.Р. Современные методы и средства цифровой рентгенографии (обзор) // Заводская лаборатория. – 1994. – Т. 60. – № 6. – С. 28–34.
  13. Современное состояние и перспективы создания конкурентоспособных на мировом рынке систем цифровой радиографии (СЦР) / В.А. Клименов, В.А. Касьянов, М.Б. Лебедев, Ю.А. Москалев, А.К. Темник, М.М. Штейн, С.В. Чахлов // Контроль. Диагностика. – 2011. – Специальный выпуск. – С. 25–29.
  14. Волков, В.Г. Мониторы тормозного излучения бетатронов для контроля крупногабаритных изделий и транспортных средств/ В.Г. Волков, М.М. Штейн // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 9. – С. 78–80.
  15. Клименов, В.А. Идентификация вещества объекта контроля методом дуальных энергий/ В.А. Клименов, С.П. Осипов А.К. Темник // Дефектоскопия. – 2013. – № 11. – С. 40–50.
  16. Трехэнергетическая цифровая радиография для разделения веществ с малым эффективным атомным номером / В.Д. Рыжиков, А.Д. Ополонин, В.Г. Волков, Е.К. Лисецкая, С.Н. Галкин, Е.Ф. Воронкин // Вісник НТУ «ХПІ» . – 2013. – № 34 (1007). – С. 43–51.
  17. Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики неразрушающего контроля и инспекции / В.А. Клименов, Ю.В. Алхимов, А.М. Штейн, С.В. Касьянов, С.А. Бабиков, А.В. Батрагин, С.П. Осипов // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 31–42.
  18. Осипов, С.П. Влияние физических факторов на качество идентификации веществ объектов контроля высокоэнергетическим методом дуальных энергий/ С.П. Осипов, А.К. Темник, С.В. Чахлов // Дефектоскопия. – 2014 .– № 8. – С. 69–77.
  19. Pourghassem H. Material detection based on GMM-based power density function estimation and fused image in dual-energy X-ray images/ Pourghassem H.,

- Fesharaki N.J., Tahmasebi A. // Proceedings 4th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, CICN 2012 . – 6375134. – P. 364–368.
20. Optimized acquisition geometry for X–ray inspection / I. Frosio, N.A. Borghese, F. Lissandrello, G. Venturino, G. Rotondo // Conference Record – IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 2011 . – 5944195. – P. 300–305.
21. Radiography simulation on single–shot dual–spectrum X–ray for cargo inspection system / Y. Gil, Y. Oh, M. Cho, W. Namkung // Applied Radiation and Isotopes. – 2011. – V. 69. – № 2. – P. 389–393.
22. Opolonin O.D. Increasing informativity of digital radiographic systems/ O.D. Opolonin, V.D. Ryzhikov // Functional Materials. – 2013. – V. 20. – No 4. – P. 528–533.
23. Linac based photofission inspection system employing novel detection concepts / J. Stevenson, T. Gozani, M. Elsalim, C. Condron, C. Brown // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2011. – V. 652. – № 1. – P. 124–128.
24. Scatter in cargo radiography / Erin A. Miller, Joseph A. Caggiano, Robert C. Runkle, Timothy A. White, Aaron M. Bevill // Applied Radiation and Isotopes. – 2011. – V. 69. – № 3. – P. 594–603.
25. X–ray cargo container inspection system with few–view projection imaging / Xinhui Duan, Jianping Cheng, Li Zhang, Yuxiang Xing, Zhiqiang Chen, Ziran Zhao // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2009. – V. 598. – № 2. – P. 439–444.
26. Современное состояние и перспективы развития систем цифровой рентгенографии для досмотрового контроля объектов /В.А. Удод, Ван Я., С.П. Осипов, С.В., Чахлов А.К. // Информационные технологии неразрушающего контроля : сборник научных трудов Российской школы конференции с международным участием, Томск, 27–30 октября 2015 г. / Темник

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — С.48–53.

27. Малышенко, Ю.В. Начальная подготовка персонала инспекционно-досмотровых комплексов: учебник / Ю.В. Малышенко, С.С. Ерошенко, С.В. Симочко; под ред. Ю.В. Малышенко; Российская таможенная академия, Владивостокский филиал.— Владивосток: РИО Владивостокского филиала Российской таможенной академии, 2010. — 460с.

28. Досмотровые комплексы для контроля грузового автотранспорта, разработанные МИРЭА / Е.Ю. Усачев, М.Б. Лебедев, А.Н. Передерий, С.А. Щетинкин, А.Д. Гмарь, С.А. Осадчий, В.А. Касьянов, М.М. Штейн, С.В. Чахлов // Информационные технологии неразрушающего контроля : сборник научных трудов Российской школы конференции с международным участием, Томск, 27–30 октября 2015 г. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — С.73–82.

29. Программный комплекс для восстановления интроскопических изображений с использованием метода дуальной энергии /Бердников Д.О. Спирин, А.Н. Передерий, М.В. Сафонов, И.В. Романов // PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY/ Ю.Н. Гавриш, Я.А., 2010. № 3. Series: Nuclear Physics Investigations (54), p.123–125.

30. Критерии адекватности моделей досмотровых комплексов с функцией идентификации веществ объектов контроля / С.П. Осипов, С.В. Чахлов, О.С. Осипов, А.М. Штейн, В.А., Удод Ван Яньчжао // Информационные технологии неразрушающего контроля: сборник научных трудов Томск, 27–30 октября 2015 г. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — С.59–67.

31. About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method/ S.P. Osipov, S.V. Chakhlov, O.S., Osipov A.M. Shtein, D.V. Strugovtsov // Materials Science and Engineering Conference Series.— 2015, Vol. 81, No. 1, pp. 2082.

32. High-energy radiography for detecting details in highly complex packings //

Materi–als testing. Kolkoori S, Wrobel N, Osterloh K, Redmer B, Deresch A, Ewert U. – 2013, Vol. 55, No. 9, pp. 683–688.

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

34. Rebuffel V., Dinten J.M. Dual–energy X–ray imaging: benefits and limits. In–sight–non–destructive testing and condition monitoring. – 2007, Vol. 49, No. 10, pp. 589–594.

35. An optimised method for material identification using a photon counting detector/ Beldjoudi G., Rebuffel V., Verger L., Kaftandjian V., Rinkel J.// Nuclear instruments and methods in physics research. Section A: accelerators, Spectrometers, detectors and associated equipment. – 2012, Vol. 663, No. 1, pp. 26–36.

36. Chakhlov S.V. High–energy digital X–ray imaging method for substance identification/ S.V. Chakhlov, S.P Osipov. // Kontrol'. Diagnostika. – 2013, No. 9, pp. 9–17.

37. Zav'yalkin, F.M. and Osipov, S.P. Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions, At. energ., 1985, vol. 59, no. 4, pp. 281–283.

38. Siegbahn, K. Alpha–, beta–and gamma–ray spectroscopy. – Elsevier, 2012

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

40. Schiff, L.I. Energy–angle distribution of thin target bremsstrahlung // Physical review. – 1951. – Vol. 83. – No 2. – pp. 252–253.

41. Экспериментальные исследования возможности распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий для малых доз облучения./ А.Д. Абашкин, С.П. Осипов, С.В. Чахлов, А.М. Штейн // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее : сборник научных трудов, г. Томск. 5–10 октября 2015 г. в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2015. — Т. 1. — С.10–13

42. СанПиН 2.6.1.2369–08 – Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при обращении с лучевыми досмотровыми установками
43. СанПиН 2.2.4.548–96 – Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы
44. ГОСТ 12.0.003–74 – Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1)
45. СНиП 23–05–95\*, СП 52.13330.2011 – Естественное и искусственное освещение
46. ГОСТ Р12.1.019–2009 – Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
47. ГОСТ12.1.030–81 – Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1)
48. НРБ–99/2009 – Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523–09 "Нормы радиационной безопасности
49. ГОСТ Р50923–96 – Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения
50. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (123–ФЗ от 22 июля 2008 г.

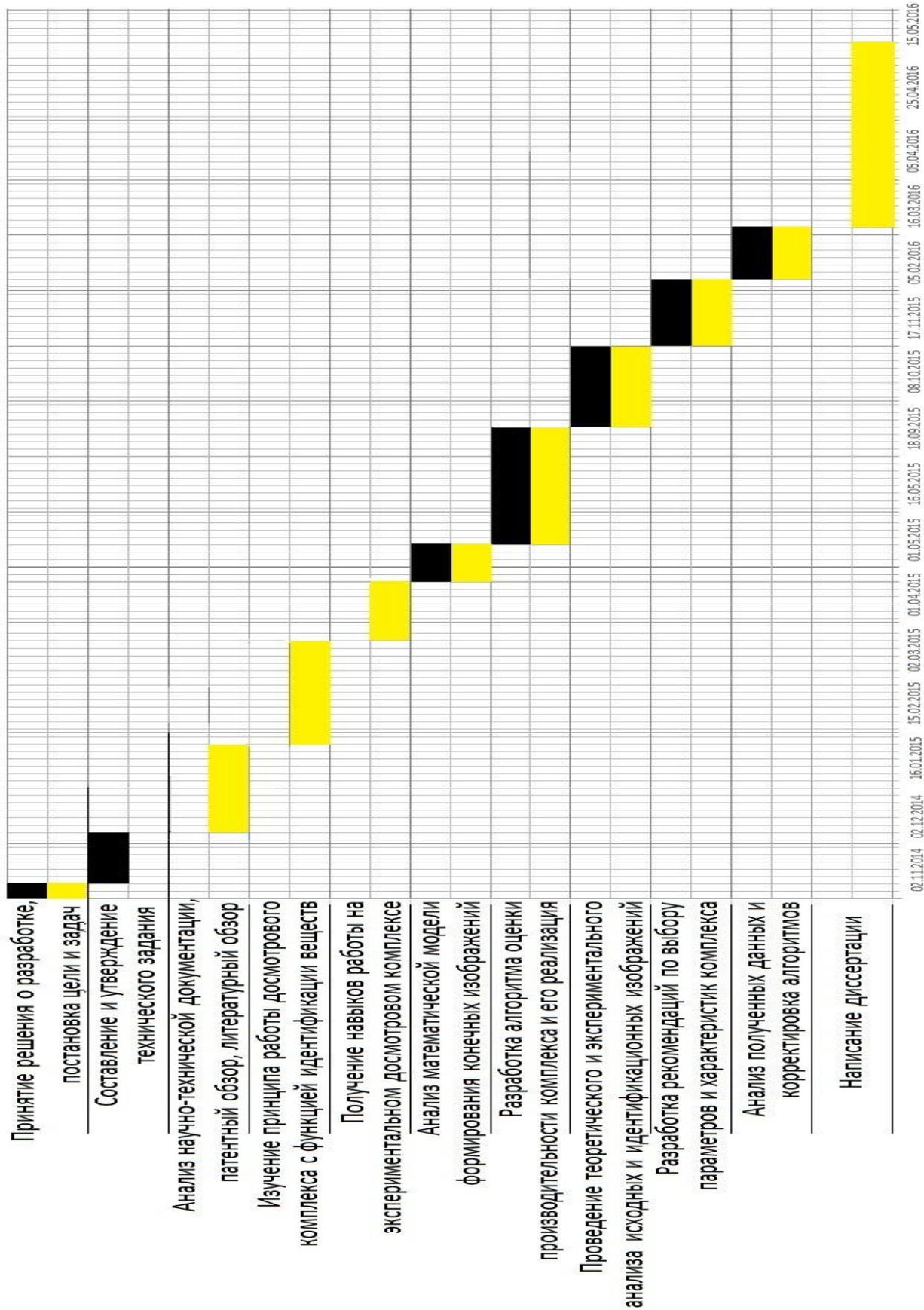
Таблица А1 – Массогабаритные параметры 20-футовых контейнеров

20-футовый контейнер стандартный	20-футовый изолированный контейнер	20-футовый контейнер-платформа	20-футовый контейнер Flatrack	20-футовый контейнер-рефрижератор	20-футовый контейнер с открытым верхом	20-футовый танк-контейнер
<b>Тара, кг</b>						
2200	2450	1940	3100	3500	2240	4000
<b>Вес груза, кг</b>						
21700	17760	21520	20000	24000	21500	21000
<b>Внешние габариты (Длина x Ширина x Высота), м</b>						
6,06x2,44x2,59	6,06x2,44x2,44	6,06x2,44x0,23	6,06x2,44x2,59	6,06x2,44x2,6	6,06x2,44x2,59	6,06x2,44x2,6
<b>Внутренние габариты (Длина x Ширина x Высота), м</b>						
5,90x2,35x2,40	5.65x2.24x1.86	-	5,85x2,23x2,15	5,49x2,25x2,2	5,90x2,35x2,4	-

Таблица А2 – Массогабаритные параметры 40-футовых контейнеров

40-футовый контейнер стандартный	40-футовый High Cube контейнер	40-футовый контейнер-рефрижератор	40-футовый High Cube контейнер-рефрижератор	40-футовый Open Top контейнер
<b>Тара, кг</b>				
3980	4150	4350	4350	4350
<b>Вес груза, кг</b>				
26500	26300	26300	26300	26300
<b>Внешние габариты (Длина x Ширина x Высота), м</b>				
12,19x2,44x2,59	12,19x2,44x2,90	12,19x2,44x2,60	12,19x2,44x2,90	12,19x2,44x2,59
<b>Внутренние габариты (Длина x Ширина x Высота), м</b>				
12,03x2,35x2,40	12,03x2,35x2,70	11.56x2.29x2.28	11,56x2,29x2,50	12.03x2.35x2.31

## Приложение Б (обязательное) Диаграмма Ганта



**Приложение В  
(обязательное)**

**Раздел 3.1.1**

Accuracy of the Discrimination Parameter Estimation for the Dual High–Energy Method

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Струговцов Дмитрий Владиславович		

Консультант кафедры ФМПК :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
в.н.с. лаб. №40 ИНК ТПУ	Осипов Сергей Павлович	к.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Устюжанина Анна Константиновна	к.фил.н.		

A set of the mathematical formulas to estimate the accuracy of discrimination parameters for two implementations of the dual high energy method – by the effective atomic number and by the level lines is given. The hardware parameters which influenced on the accuracy of the discrimination parameters are stated. The recommendations to form the structure of the high energy X–ray radiation impulses are formulated. To prove the applicability of the proposed procedure there were calculated the statistical errors of the discrimination parameters for the cargo inspection system of the Tomsk polytechnic university on base of the portable betatron MIB–9. The comparison of the experimental estimations and the theoretical ones of the discrimination parameter errors was carried out. It proved the practical applicability of the algorithm to estimate the discrimination parameter errors for the dual high energy method.

The different implementations of digital radiography are widely used for the custom examination and for the flaw detection [1–4]. One of the major implementation of the digital radiography is a dual energy method (DEM) [5–8], which can discriminate the testing object (TO) materials. The discrimination for the custom examination means the correlation of test object material or their constituent with one of the extensive material classes. The mentioned division of the materials to classes is carried out by two main methods [8–11] – by effective atomic number and by level line method. In any modification of DEM on the initial stage there are generated two digital radiographs for two specially selected maximal X–ray energies. One of the important quality index of the radiographic system with the option of discrimination of TO material and their constituents is a precision of the discrimination parameters. This index is essentially dependent from many factors, for example, from the range of effective atomic numbers and from TO constituent sizes, from the given error of the discrimination parameter, from the maximal high energy of X–ray radiation. The state of the art analysis shows that the estimation task of the discrimination quality of the TO material and

their constituents for major implementations of the discrimination method by dual high energy method is not solved in corpore.

### **The estimation of the discrimination parameter errors for the dual high energy method**

To solve the problem of the discrimination TO materials and their constituents by DEM there are used different versions of two major approaches [8]. The first approach estimates the effective atomic number of the TO material. The second approach [8] generates the discrimination parameter image. The value of every image point is compared with some level lines, and the comparison result is used to correlate T material with one or another class of material. The mentioned approaches are differed essentially by the volume of used preliminary information and by the algorithms of the primary radiograph processing therefore it is necessary to consider a specific character of the mathematical models to discriminate TO materials by use the DEM for the both abovementioned approaches.

Let consider some common part of the abovementioned discrimination approaches.

#### *Common part*

On the output of the digital radiographic system with the TO material discrimination option the maximal X-ray energies  $E_i$ ,  $i=1,2$  are corresponded to the primary radiographs  $\mathbf{J}_i = \{J_i(x, y) : (x, y) \in S\}$ ,  $i = 1,2$ , where  $S$  is a discrete set of  $\mathbb{R}^2$ . The physical meaning of the primary radiographs is the distribution of the absorbed energy of the primary attenuated X-ray radiation along the set  $S$ .

In the introduction we emphasized that the major characteristic of the discrimination quality is the discrimination parameters error, which evidently related with noise level of the primary radiographs. The research purpose of is to detect the mutual relation of the major customer characteristic with the cargo inspection system parameters, therefore we shall make more detailed analysis of

the noise transformation during the step-by-step processing of the primary images.

On first stage we shall estimate the noise levels on the original images. In the first approximation we shall consider the radiation source as a point and isotropic one. Let suppose that the sensitivity volume of the singled radiometric detector has a rectangular prism form, which the center axis is oriented to the radiation source. The radiometric detector has size  $h_d$  in the propagation direction of the primary X-ray beam, but in the perpendicular plane –  $a_d \times b_d$ . The distance between the radiation source and the front surface of the detector is equal to  $F$ . At the first stage of the design there is known some characteristic of the X-ray radiation source –  $P_{0max}$ , for example, the absorbed dose power or exposure dose of X-ray radiation on air at 1 meter distance and  $\nu$  is a frequency of X-ray radiation impulses. The maximal energy  $E$  of X-ray radiation is adjustable value and can take values in the range from  $E_{min}$  to  $E_{max}$ . The control system of X-ray source can generate the sequence of alternated impulses with maximal energies  $E_1$  and  $E_2$ ,  $E_{min} < E_1 < E_2 < E_{max}$  according to a defined principle. We would name as an impulse package a collection of the serial X-ray radiation impulses, those need to produce a single line of the primary shadow radiographs  $J_1, J_2$ , corresponding one another.

For the pulse X-ray radiation sources the time is measured in the pulse period –  $1/\nu$ . The number of impulses  $n$  in a package, which is need to generate a single line of the identification image, is equal to the sum of impulses with energy  $E_1 - n_1$  and impulses with energy  $E_2 - n_2$ . Here the identification image is a distribution of the calculated effective atomic number or discrimination parameter of the level lines method along the set  $S$ . The value  $n$  defines the inspection performance. The maximal performance of the radiographic system with option of the TO material discrimination and their constituents is reached for  $n_1=1, n_2=1$ . Evidently that in practice it is reasonable to advance a requirement  $n_2 < n_1$ . Let

introduce a parameter  $p=n_1/n_2$ . If the parameter  $p$  and the number of impulses in the package  $n$ , are known that  $n_2=n/(1+p)$  and  $n_1=np/(1+p)$ .

For the customer it is most interesting the minimal size of constituent, for which the material is surely discriminated by DEM. Let the projection of the specified constituent on the set  $S$  is consisted from  $M$  pixels.

Note that for every X–ray radiation source with the regulated maximal energy it is known a function  $W$ , which describes the dependence of the X–ray radiation source characteristic  $P_0$  from the current value of the maximal energy  $E$ . Let the mentioned dependence has the following form

$$P_0(E) = P_{0max} W(E, E_{max}) \quad (B.1)$$

The function  $W(E, E_{max})$  in the range of the maximal X–ray energies above 2 MeV is a smooth increasing function, for example, to describe the absorbed dose power [12] there is used the power dependence  $W(E, E_{max})=(E/E_{max})^3$ .

The number of photons  $N_{0i}$  of the X–ray radiation with the maximal energy  $E_i$ , whose are intersected the front surface of the single detector in the time unit when the test object is absent, is executed by formula

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

where  $C$  is the conversion coefficient of the X–ray radiation source characteristic to dimension MeV/sec;  $f(E, E_i)$  is the energy spectrum of the X–ray radiation with maximal energy  $E_i$ ;  $\mu_{ab\ air}(E)$  is the linear absorption coefficient of the proton radiation with energy  $E$  in the air.

Let the X–ray radiation flow is weaken by the test object with the thickness  $\rho H$  and the material's effective atomic number  $Z$ . In this case the number of photons  $N_i(\rho H, Z)$  of the X–ray radiation with the maximal energy  $E_i$ , whose are not interacted with the TO and are registered by the radiometric detector in the time unit, is defined by the approximate expression

$$N_i(\rho H, Z) \approx N_{0i} \int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E,Z)\rho H} [1 - e^{-\mu_d(E)h_d}] dE, \quad (B.3)$$

where  $m(E,Z)$  is the mass attenuation coefficient of the photon radiation with energy  $E$  by the test object material;  $\mu_d(E)$  is the linear attenuation coefficient of the proton radiation with energy  $E$  by the detector material.

The formula to estimate the radiometric signal beyond the test object thickness  $\rho H$  and the effective atomic number  $Z$  is  $I_i(\rho H, Z)$ ,  $i=1,2$  without contribution of the background noises of the radiometric detectors has the form

$$I_i(\rho H, Z) = N_i(\rho H, Z) n_i \overline{E_{iab}(\rho H, Z)}, \quad (B.4)$$

where  $\overline{E_{iab}(\rho H, Z)}$  is the mean value of the absorbed energy of the registered X-ray photon with maximal energy  $E_i$  beyond the testing object. The values  $\overline{E_{iab}(\rho H, Z)}$  are calculated by the following way

$$\overline{E_{iab}(\rho H, Z)} = \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_i) e^{-m(E,Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E,Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}, \quad (B.5)$$

where  $\overline{E_{ab}(E)}$  is the mean energy value of the registered photon with energy  $E$  [13].

The dispersion of the radiometric signals  $I_i(\rho H, Z) - DI_i(\rho H, Z)$ ,  $i= 1,2$  are calculated by formula [13]

$$DI_i(\rho H, Z) = n_i N_i(\rho H, Z) \overline{E_{iab}^2(\rho H, Z)} = n_i N_i(\rho H, Z) \overline{E_{iab}(\rho H, Z)}^2 \eta_i^2(\rho H, Z), \quad (B.6)$$

where  $\overline{E_{iab}^2(\rho H, Z)}$  and  $\eta_i^2(\rho H, Z)$  are the mean values of the absorbed energy square for the registered photons and the accumulation coefficient of fluctuations for X-ray radiation with the maximal energy  $E_i$  beyond the testing object under investigation. The formula to calculate  $\overline{E_{iab}^2(\rho H, Z)}$  has the form similar to (B.5)

$$\overline{E_{ab}^2(\rho H, Z)} = \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}^2(E)} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}, \quad (\text{B.7})$$

where  $\overline{E_{ab}^2(E)}$  is the mean value of the energy square of the registered photon with energy  $E$ , which can be calculated, for example, by use formulas from [13].

After substitution (B.3) and (B.7) to formula (B.6) we get the expression coupling the dispersion  $DI_i(\rho H, Z)$  with the number of impulses  $n_i$ .

$$DI_i(\rho H, Z) = N_i(\rho H, Z) n_i \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}^2(E)} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}. \quad (\text{B.8})$$

At the next stage we consider the process of the noise transformation during the generation from primary images  $J_i$  the resulting radiographs  $\mathbf{R}_i = \{R_i(x, y) : (x, y) \in S\}$ .

The transformation of the primary images  $J_i$  to the resulting images  $R_i$  is consisted from several transformations, whose are the «black» calibration, the «white» calibration, the normalization on the reference detector signal, taking the logarithm. The «black» calibration is reduced to the subtraction of the mean values of the background noises levels of the radiometric detectors  $J_b$ . For the detectors  $J_b$  can be the determined values. During the «white» calibration the signals from the detectors are normalized on the signals without the testing object  $I_{0i} = J_{0i} - J_b$  is the calibration. The transformation of the original radiometric signals  $J_i(x, y)$  to  $I_i(x, y)$ , and then to  $R_i(x, y)$  is described by formula

$$R_i(x, y) = -\ln \frac{J_i(x, y) - J_b}{J_{0i} - J_b} = -\ln \frac{I_i(x, y)}{I_{0i}}. \quad (\text{B.9})$$

The values of  $R_i(x, y)$  are numerically equal to the ray-lengths of the testing object for the X-ray radiation with the maximal energy  $E_i$  along the line,

connecting the source point and the detector point with coordinates  $(x,y)$ , the measurement unit is the length of mean free path.

The dispersions  $R_1$  and  $R_2$  are estimated by use decomposition of (B.9) on small increments. The final expressions to calculate the dispersions  $DR_1(\rho H, Z)$  and  $DR_2(\rho H, Z)$  for the testing object thickness  $\rho H$  and the effective atomic number  $Z$  have the form

$$DR_i(\rho H, Z) = \frac{DI_i(\rho H, Z)}{I_i^2(\rho H, Z)} + \frac{DI_i(0,0)}{I_i^2(0,0)}, \quad (\text{B.10})$$

where  $I_i(0,0)$ ,  $DI_i(0,0)$  are the signal value and the signal dispersion when the testing object is absent.

With including (B.4), (B.8) the expression (B.10) would have the following form

$$DR_i(\rho H, Z) = \frac{\tau_i(\rho H, Z)}{n_i}, \quad \tau_i(\rho H, Z) = \frac{\eta_i^2(\rho H, Z)}{N_i(\rho H, Z)} + \frac{\eta_i^2(0,0)}{N_i(0,0)}, \quad (\text{B.11})$$

where  $N_i(0,0)$ ,  $\eta_i(0,0)$  are the number of protons registered by detector and the accumulation coefficient of fluctuations without the testing object.

Note 1. In practice the «white» calibration is carried out by the large number of the image lines  $k_0$ , therefore the parameter estimations  $\tau_i$  are defined by the expression

$$\tau_i(\rho H, Z) = \frac{\eta_i^2(\rho H, Z)}{N_i(\rho H, Z)} + \frac{\eta_i^2(0,0)}{k_0 N_i(0,0)}, \quad (\text{B.12})$$

where  $\overline{N_i(0,0)}$  is the selective mean of the photon number registered by detector without the testing object. For large values of  $k_0$  the second summand in sums (B.11), (B.12) can be not included.

At the next stage the further transformations of the noise levels are depended from the image processing algorithms.

Note 2. The expressions to estimate the dispersions  $R_1(\rho H, Z)$  and  $R_2(\rho H, Z)$  for the testing object thickness  $\rho H$  and the effective atomic number  $Z$  (B.10), (B.11) are derived without consideration of the pulsed X–ray radiation instability.

In this case the instability means that the parameters characterized the single X-ray radiation pulse are the random values. The instability influence minimization is achieved by the normalization of the detector signals  $I_i(\rho H, Z)$  on the signals from the reference detector  $I_{pi}$ . The reference detector signals  $I_{pi}$  are not dependent from the testing object. The expression to estimate the dispersion of the normalized signal  $I_i(\rho H, Z)/I_{pi} - D(I_i(\rho H, Z)/I_{pi})$  has the following form

$$D\left(\frac{I_i(\rho H, Z)}{I_{pi}}\right) = \frac{I_{pi}^2 DI_i(\rho H, Z) + I_i^2(\rho H, Z) DI_{pi}}{I_{pi}^4}. \quad (\text{B.13})$$

The expression (B.13) was derived for the condition of the full compensation of instability, which can be reached in that case when only the number of electrons dropped on the accelerator's target is instable [14].

From analysis of expression (B.13) it follows that during implementation of some requirements to the reference channel the estimation of the signal dispersions  $R_1(\rho H, Z)$  and  $R_2(\rho H, Z)$  can be done by the expressions (B.10), (B.12) whereas the first note. The abovementioned requirements in the formalized form look like

$$I_{pi} \gg I_i(\rho H, Z). \quad (\text{B.14})$$

The physical implementation of the restriction (B.14) is reduced to use as the reference channel the special selected radiometric detector working synchronously with the measurement channels and distinguish from them by the large amount of registered photons and by the low value of the fluctuation accumulation coefficient.

#### *Discrimination by the effective atomic number*

As result of the combined processing of the resulting radiographs  $R_1$  and  $R_2$  there are producing the DEM parameters images – **A** and **B**. To estimate DEM parameters  $A(x, y)$  and  $B(x, y)$  for every point  $(x, y)$  of set  $S$  there is solved the non-linear equation system

$$\begin{aligned}
& - \ln \frac{\int_0^{E_1} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-A(x,y)w_1(E)-B(x,y)w_2(E)} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_1} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE} = R_1(x, y) \\
& - \ln \frac{\int_0^{E_2} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_2) e^{-A(x,y)w_1(E)-B(x,y)w_2(E)} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_2} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_2) [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE} = R_2(x, y),
\end{aligned} \tag{B.15}$$

where  $w_1(E)$ ,  $w_2(E)$  are the energy dependencies of two main types of the photon radiation interaction with the testing object material. The first process in the system (B.15) is the Compton Effect and the second one is the pair production.

To solve the system (B.15) relative to the parameters  $A(x,y)$  and  $B(x,y)$  it is necessary know the maximal energy values –  $E_1$  and  $E_2$ , the energy spectra  $f(E, E_1)$  and  $f(E, E_2)$ , the energy dependencies  $\overline{E_{ab}(E)}$ ,  $w_1(E)$  and  $w_2(E)$ . There are known the analytical descriptions of the energy dependencies of the mean value of the registered photon energy [13] and the interaction cross–section of the photon radiation with the material, for example [15]. Besides the analytical dependencies we can use the database of the gamma radiation interaction with the material [16, 17].

The certain complication during the organization of the preliminary information for the system (B.15) is related with the estimation of the energy spectra of the high–energy X–ray radiation. At the present time there is used the analytical approach to describe  $f(E, E_i)$ , which is based on the Shiff's formula [18–20] adjusted for the attenuation in the radiation source filters and adjusted for the registration efficiency of the photon radiation.

During solution of the system (B.15) the random value dispersions  $A$ ,  $B$  –  $DA$  and  $DB$ , and also the covariation  $cov(A,B)$  are founded by the least increments method application. The final expressions for the dispersions  $DA(\rho H, Z)$ ,  $DB(\rho H, Z)$  and the covariation  $cov(A,B)(\rho H, Z)$  for the testing object thickness  $\rho H$  and the effective atomic number  $Z$  have the form

$$\begin{aligned}
DA(\rho H, Z) &= \frac{g_{22}^2 DR_1(\rho H, Z) + g_{12}^2 DR_2(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}, \\
DB(\rho H, Z) &= \frac{g_{11}^2 DR_2(\rho H, Z) + g_{21}^2 DR_1(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}, \\
\text{cov}(A, B)(\rho H, Z) &= \frac{-g_{22}g_{21}DR_1(\rho H, Z) - g_{12}g_{11}DR_2(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}.
\end{aligned} \tag{B.16}$$

where

$$\begin{aligned}
g_{ij} = g_{ij}(\rho H, Z) &= \frac{\int_0^{E_i} w_j(E) \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_1) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_d}] dE}, \\
G(\rho H, Z) &= g_{11}(\rho H, Z)g_{22}(\rho H, Z) - g_{12}(\rho H, Z)g_{21}(\rho H, Z).
\end{aligned}$$

The substitution (11) in (16) gives

$$\begin{aligned}
DA(\rho H, Z) &= \frac{g_{22}^2 \tau_1(\rho H, Z)/n_1 + g_{12}^2 \tau_2(\rho H, Z)/n_2}{G^2(\rho H, Z)}, \\
DB(\rho H, Z) &= \frac{g_{11}^2 \tau_2(\rho H, Z)/n_2 + g_{21}^2 \tau_1(\rho H, Z)/n_1}{G^2(\rho H, Z)}, \\
\text{cov}(A, B)(\rho H, Z) &= \frac{-g_{22}g_{21} \tau_1(\rho H, Z)/n_1 - g_{12}g_{11} \tau_2(\rho H, Z)/n_2}{G^2(\rho H, Z)}.
\end{aligned} \tag{B.17}$$

The final research stage of the noise transformation is connected with the estimation of the effective atomic number dispersion. In the high-energy domain [8] the effective atomic number estimation  $Z_v(\rho H, Z)$  is related to the DEM parameters by the following expressions  $A(\rho H, Z)$  and  $B(\rho H, Z)$  [8]

$$Z_v(\rho H, Z) \approx \frac{B(\rho H, Z)}{A(\rho H, Z)}. \tag{B.18}$$

Applying the least increments method to (B.18) we get for the testing object thickness  $\rho H$  and the material's effective atomic number –  $Z$  the formula to calculate the dispersion of the effective atomic number estimation  $Z_v(\rho H, Z) - DZ_v(\rho H, Z)$

$$DZ_v(\rho H, Z) \approx \frac{A^2 DB(\rho H, Z) + B^2 DA(\rho H, Z) - 2AB \text{cov}(A, B)(\rho H, Z)}{A^4}. \tag{B.19}$$

Let substitute the expression (B.17) in the formula (B.19). After simple conversions the expression to estimate the effective atomic number dispersion reduce to the form

$$DZ_v(\rho H, Z) \approx \frac{(Ag_{21} + Bg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z)/n_1 + (Ag_{11} + Bg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z)/n_2}{G^2(\rho H, Z)A^4}. \quad (\text{B.20})$$

We are interesting in the relation of the dispersion of the estimated testing object parameter  $DZ_v(\rho H, Z)$  with the number of pulses in the package  $n=n_1+n_2$ , with the parameter  $p= n_1/n_2$  and with the physical TO characteristics – the mean value of the material's effective atomic number  $Z$  and with the thickness  $\rho H$ . The parameters of the high-energy implementation of DEM  $A(\rho H, Z)$  and  $B(\rho H, Z)$  are related to  $Z$  and  $\rho H$  by the following way [8]

$$A(\rho H, Z) = \rho H, \quad B(\rho H, Z) = Z\rho H. \quad (\text{B.21})$$

After substitution of (B.21) in (B.20) under conditions  $n_2=n/(1+p)$  and  $n_1=np/(1+p)$  we get

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

The expression (B.22) together with formulas (B.11), (B.12) allow to estimate the measurement accuracy of the TO material's effective atomic number, in term of the time to generate lines of the primary radiographs, the TO parameters, the maximal energies of the X-ray radiation. The measurement accuracy of the effective atomic number  $Z$  can be estimated by the least-square deviation  $\Delta Z - \Delta Z_v(\rho H, Z) = \sqrt{DZ_v(\rho H, Z)}$ .

Evidently, that there is exist the optimal value of the parameter  $p$ , for which the dispersion value  $DZ_v(\rho H, Z)$  under fixed values  $Z$  and  $\rho H$  is minimal. The formula to calculate  $p_{opt}$  has form

$$p_{opt}(\rho H, Z) = \frac{g_{21} + Zg_{22}}{g_{11} + Zg_{12}} \sqrt{\frac{\tau_1(\rho H, Z)}{\tau_2(\rho H, Z)}}. \quad (\text{B.23})$$

The dispersion value  $DZ_v(\rho H, Z)$  corresponding to  $p_{opt}$ , is defined by substitution (B.23) in (B.22).

The formula (B.22) can calculate the number of pulses in the package which need to generate the line's pair of the images  $I_1$  and  $I_2$ , on the basis of the user defined maximal deviation of the effective atomic number  $\Delta Z_{lim}$ . The mentioned maximal deviation of the effective atomic number  $\Delta Z_{lim}$  is named the resolution by  $Z$ . The unknown expression has the form

$$n(\rho H, Z) \approx \frac{(1+p) \left[ (g_{21} + Zg_{22})^2 \tau_1(\rho H, Z) / p + (g_{11} + Zg_{12})^2 \tau_2(\rho H, Z) \right]}{G^2(\rho H, Z) (\rho H)^2 \Delta Z_{lim}^2}. \quad (B.24)$$

Note 3. The expressions (B.20)–(B.22), (B.24) were derived for the case when the estimation of the effective atomic number of the testing object material or their constituent  $Z_v(\rho H, Z)$  are produced for one identification image point (one pixel). In practice the image of the minimal constituent defined by user consist of  $M$  pixels  $M \gg 1$ . Therefore it is logically to use the mean estimation value of the effective atomic number  $\overline{Z_v(\rho H, Z)}$  as the identification parameter. The dispersion of mean value  $\overline{DZ_v(\rho H, Z)}$  is defined by the formula

$$\overline{DZ_v(\rho H, Z)} = \frac{DZ_v(\rho H, Z)}{M}. \quad (B.25)$$

Including (B.25) the all mentioned in Note 3 the formulas are corrected by including the additional factor equal to  $1/M$  into the right part.

Note 4. The inspection efficiency is essentially depended of the testing object thickness  $\rho H$ . The internal structure randomness of the inspecting objects creates some dilemma before the customer. This dilemma must give the answer to the question – what is more preferable – the high inspection efficiency with the qualified discrimination of the testing object materials and their constituents with small thickness or the low inspection efficiency with the qualified discrimination of the large thickness material.

#### *Discrimination by the level lines method*

The second implementation of the testing object discrimination and their constituents by DEM we named the level lines method [8]. In this implementation on the base of resulting images  $R_1$  and  $R_2$  the identification image is created

$$\mathbf{Q} = \left\{ Q(x, y) = \frac{R_2(x, y)}{R_1(x, y)} : (x, y) \in S \right\}. \quad (\text{B.26})$$

The testing object material in the point with coordinates  $(x, y)$  is correlated with some material, if the following restriction is carried out

$$U_-(R_1(x, y)) < Q(R_1(x, y)) \leq U_+(R_1(x, y)), \quad (\text{B.27})$$

where  $U_-(x, y)$ ,  $U_+(x, y)$  are the level lines for the correlated material.

For the testing object thickness  $\rho H$  and the material's effective atomic number  $Z$  the identification parameter dispersion  $DQ(\rho H, Z) - DQ(\rho H, Z)$  is defined by the small increment decomposition

$$DQ(\rho H, Z) = \frac{R_1^2(\rho H, Z)DR_2(\rho H, Z) + R_2^2(\rho H, Z)DR_1(\rho H, Z)}{R_1^4(\rho H, Z)}. \quad (\text{B.28})$$

After substitution (10), (11) in (28) including  $n_2 = n/(1+p)$  and  $n_1 = np/(1+p)$  we get

$$DQ(\rho H, Z) = \frac{(1+p)[R_1^2(\rho H, Z)\tau_2(\rho H, Z) + R_2^2(\rho H, Z)\tau_1(\rho H, Z)/p]}{nR_1^4(\rho H, Z)}. \quad (\text{B.29})$$

The collection of the expressions (B.3), (B.9), (B.11) and (B.29) allows to estimate the identification parameter accuracy by the level lines method –  $\Delta Q(\rho H, Z) = \sqrt{DQ(\rho H, Z)}$ .

The value of the parameter  $p - p_{\text{opt}}(\rho H, Z)$ , for which the value  $DQ(\rho H, Z)$  is minimal, is calculated by the formula

$$p_{\text{opt}}(\rho H, Z) = \frac{R_2(\rho H, Z)}{R_1(\rho H, Z)} \sqrt{\frac{\tau_1(\rho H, Z)}{\tau_2(\rho H, Z)}}. \quad (\text{B.30})$$

The minimal dispersion value  $DQ(\rho H, Z)$  is defined by substitution (B.30) in the expression (B.29).

The total number of pulses  $n$ , which determine the cargo inspection performance with the material discrimination by the level lines method, is calculated from (B.29), starting from the limiting accuracy of the identification parameter  $\Delta Q_{\text{lim}}$ ,

$$n(\rho H, Z) = \frac{(1+p)[R_1^2(\rho H, Z)\tau_2(\rho H, Z) + R_2^2(\rho H, Z)\tau_1(\rho H, Z)/p]}{R_1^4(\rho H, Z)\Delta Q_{lim}^2}. \quad (B.31)$$

The expressions (B.3), (B.9), (B.11), (B.31) allow to estimate the cargo inspection performance with the option of the material discrimination by level lines method. The notes 3 and 4 from the previous section must take into account.

To show the applicability of the above mentioned algorithms for estimation of the identification parameter accuracy by high-energy DEM there was carried out the series of the mean-square deviation calculation for the identification parameter for two pairs of the maximal values of the X-ray radiation –  $E_1=4.5$  MeV,  $E_2=7.5$  MeV and  $E_1=4.5$  MeV,  $E_2=9$  MeV. The testing object thickness  $\rho H$  was varied from 10 to 120 g/cm<sup>2</sup>, but the effective atomic number  $Z$  take the values 6, 13, 26 and 82. The calculations were done for betatron MIB-4/9 with characteristics  $P_{0max}=20$  R/min for and  $E_{max}=9$  MeV,  $\nu=200$  pulses per second. The inspection geometry was characterized by the parameters: the focal length  $F=4.2$  m; the radiometric detectors on base of the CdWO<sub>4</sub> scintillator with thickness  $h_d=50$  mm and the lateral sizes  $a_d \times b_d = 5 \times 6$  mm<sup>2</sup>. The values  $n_1 = 3$ ,  $n_2 = 1$ . The minimal number of pixels in the projection on the mapping surface for the surely identified constituent is  $M=16$ .

The tables B.1 and B.2 show the calculation results  $\Delta Z_V$  and  $\Delta Q$  for the different thicknesses  $\rho H$  and the different testing object materials.

**Table B.1** – The dependence of the mean-square deviation for the effective atomic number  $\Delta Z_V$  from  $\rho H$ .

Material	$E_1 - E_2$ , MeV	$\rho H$ , g/cm <sup>2</sup>											
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
C	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	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	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	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

The analysis of the data mentioned in the table B.1, shows that the accuracy of  $Z$  is high for the small and large thicknesses. The accuracy of  $Z$  is reduced with increasing of the greater energy.

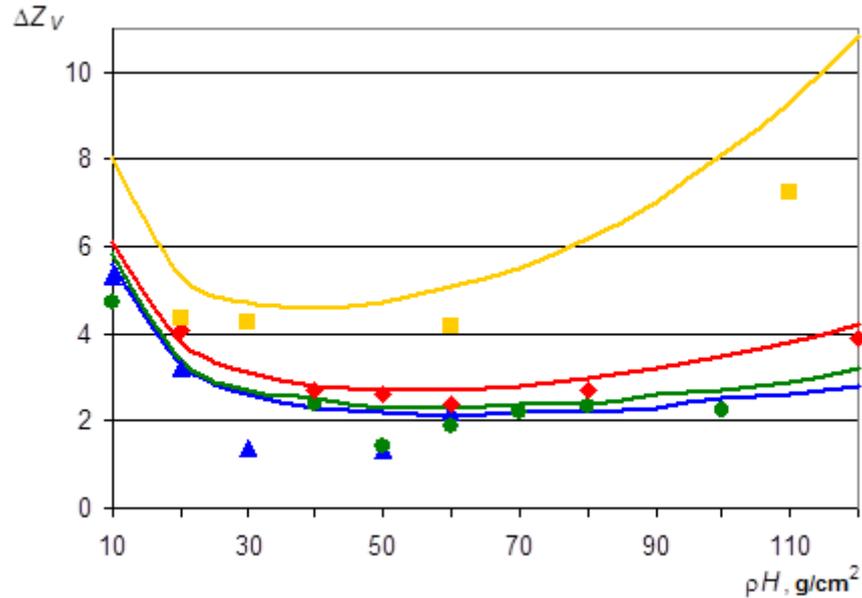
**Table B.2** – The dependence of the mean–square deviation of the discrimination parameter  $\Delta Q \times 0.01$  from  $\rho H$ .

	$E_1 - E_2,$ MeV	$\rho H, \text{g/cm}^2$											
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
C	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	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	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	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

The analysis of the data mentioned in the table B.2 shows that the accuracy of the identification parameter  $Q$  has less evident dependence from  $\rho H$  and the larger maximal energy, than the accuracy of  $Z$ .

To verify the efficiency of algorithms designed and to estimate the material identification parameter accuracy by using different implementations of the DEM, the series of experiments was done on the cargo inspection system of the Tomsk Polytechnic University. The testing object composed from the constituents with different thicknesses from the organic materials, aluminum, iron and lead, was scanned by two narrow X–ray beams  $E_1=4.5$  MeV,  $E_2=9$  MeV. The experimental conditions differed from the calculation conditions only by the power of the

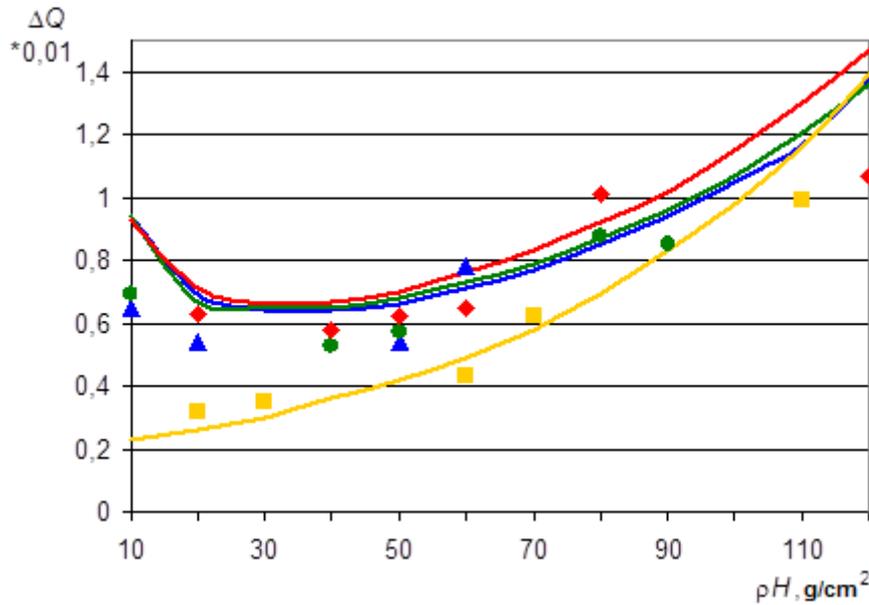
exposition dose –  $P_{0max}=5$  R/min. The indicated power was selected to provide the stable work of the betatron for a long time. The figures B.1 and B.2 show the results of the comparison the experimental and the numerical dependencies  $\Delta Z_V(\rho H)$  and  $\Delta Q(\rho H)$ .



**Figure B.1** – The calculated and the experimental dependencies  $\Delta Z_V(\rho H)$ :

- calculation, ■ – experiment, material – Pb;
- calculation, ◆ – experiment, material – Fe;
- calculation, ● – experiment, material – Al;
- calculation, ▲ – experiment, organics.

From analysis of the data presented on figures B.1 and B.2 it follows that in the considered range of the test object thicknesses the experimental estimations of the identification DEM parameter accuracy are close to the numerical ones, or less than it. It proves the applicability of the proposed algorithms to estimate the accuracy of effective atomic number and the identification parameter of the level lines method in practice.



**Figure B.2** – The calculated and the experimental dependencies  $\Delta Q(\rho H)$ :

- calculation, ■ – experiment, material – Pb;
- calculation, ◆ – experiment, material – Fe;
- calculation, ● – experiment, material – Al;
- calculation, ▲ – experiment, organics.

Previously it was shown that the DEM identification parameters accuracy is essentially depending from value  $p$ . The parameter  $p$  is equal to the ratio of the number of the pulses with the less maximal X-ray energy in the package to the one with the larger maximal energy. Before it was emphasized that there are exist the optimal values of the parameter  $p - p_{opt}$ , for which the dispersion values of the identification parameters are minimal.

The parameter  $p_{opt}$  for the identification parameter  $Z$  is calculated by use the formula (23), and for the identification parameter  $Q$  – with use the expression (30). The series of the calculation of the dependencies of  $p_{opt}(\rho H, Z)$  for the identification parameters  $Z$  and  $Q$  for the conditions of the numerical example from section 3 was carried out. The dependencies of  $p_{opt}(\rho H)$  for the objects from carbon, aluminum, iron and lead are given in the table B.3.

From analysis of the data in the table B.3 a number of conclusions can be done. The first conclusion – with increasing the object thickness  $\rho H$  the values of  $p_{opt}$  are increased during identification by  $Q$  and by  $Z$ . The second conclusion – the values of  $p_{opt}$  for the  $Q$  identification are practically closed to the similar values of  $p_{opt}$ , for the  $Z$  identification the divergence is not more than 10 %. The third conclusion – the values of  $p_{opt}$  for the usage of the pair of maximal energies 4.5 – 9 MeV are always large than values of  $p_{opt}$  for the usage of the maximal energies pair 4.5 – 7.5 MeV. We can make the following recommendations how to use the table B.3. The number of pulses in the package  $n$  is selected by the formulas (B.24) or (B.31) including the notes 3, 4. The number of pulses of the larger energy  $n_2$  is the maximum from two numbers – the nearest integer to  $n/(1+p_{opt})$  and 1, but it is logically to get as  $n_1$  the maximum of the nearest integer to  $np_{opt}/(1+p_{opt})$  and 1.

**Table B.3** – The optimal values  $p_{opt}$ .

		$E_1 - E_2,$ MeV	$\rho H, \text{g/cm}^2$											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
C	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	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	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	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	2.00	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	3.00

The study gives the collections of the mathematical relations which allow to estimate the identification parameter accuracy for the two DEM implementations – the discrimination by the effective atomic number and the discrimination by the level lines method. The example of the identification parameter accuracy calculation was done for the cargo inspection system of the Tomsk polytechnic university on the base of the portable betatron MIB–4/9. The results of the comparison the theoretical and the experimental estimations of the identification parameters accuracy proved the applicability of the proposed algorithms to validate the quality of the radiographic systems with the material discrimination option for the testing object and their constituents. There are formulated the recommendations to select a structure of the package of X–ray radiation impulses, which produce a single line of the dual energy image.

### References

1. High–energy radiography for detecting details in highly complex packings / Kolkoori S, Wrobel N, Osterloh K, Redmer B, Deresch A and Ewert U // *MPMater Test.* 55 683–8
2. Mery D 2014 Computer vision technology for X–ray testing *Insight–non–destructive testing and condition monitoring.* 56 147–55
3. Martins M N and Silva T F 2014 Electron accelerators: History, applications, and perspectives *Radiat Phys Chem.* 95 78–85
4. Ryzhikov V D, Opolonin O D, Lysetska O K, Galkin S M, Voronkin Y F and Perevertaylo V L 2013 Research on improvement of receiving–detecting circuit for digital radiographic systems with advanced spatial resolution *Nondestructive testing of materials and structures.* Springer Netherlands 6 105–9
5. Wells K and Bradley D A 2012 A review of X–ray explosives detection techniques for checked baggage *Appl Radiat Isotopes* 70 1729–46
6. Rebuffel V and Dinten J M 2007 Dual–energy X–ray imaging: benefits and limits *Insight–non–destructive testing and condition monitoring* 49 589–94

7. Beldjoudi G, Rebuffel V, Verger L, Kaftandjian V and Rinkel J 2012 An optimised method for material identification using a photon counting detector *Nucl Instrum Meth A* 663 26–36
8. Chakhlov S V and Osipov S P 2013 High–energy digital X–ray imaging method for substance identification *Kontrol'. Diagnostika* 9 9–17
9. Ji Sung, Park and Jong Kyung Kim 2011 Calculation of effective atomic number and normal density using a source weighting method in a dual energy X–ray inspection system *J Korean Phys Soc.* 59 2709–13
10. Klimenov V A, Osipov S P and Temnik A K 2013 Identification of the substance of a test object using the dual–energy method *Russian J Nondestr Test.* 49 642–9
11. Osipov S P, Temnik A K and Chakhlov S V 2014 The effects of physical factors on the quality of the dual high energy identification of the material of an inspected object *Russian J Nondestr Test.* 50 491–8
12. Ananiev L M and Stein M M 1971 On the question of the mathematical description of the betatron *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute* 180 3–7
13. Zav'yalkin, F.M. and Osipov, S.P. 1985 Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions *At Energ.* 59 281–3
14. Zav'yalkin F M and Osipov S P 1989 Effect of the instability of parameters of bremsstrahlung beams on the accuracy of radiometric measurements *Sov J Nondestr Test.* 25 108–12
15. 2006 ENDF/B–VII. 0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology Chadwick M B, Obložinský P, Herman M, Greene N M, McKnight R D, Smith D L, Young P G, MacFarlane R E, Hale G M, Franklr S C, Kahler A C, Kawano T, Little R C, Madland D G, Moller P, Mosteller R D, Page P R, Talou P, Trelue H, White M C, Wilson W B, Arcilla R, Dunford C L, Mughabghab S F, Pritychenko B, Rochman D, Sonzogni A A, Lubitz C R, Trumbull T H, Weinman J P, Brown D A, Cullen D E, Heinrichs D P,

McNabb D P, Derrien H, Dunn M E, Larson N M, Leal L C, Carlson A D, Block R C, Briggs J B, Cheng E T, Huria H C, Zerkle M L, Koziar K S, Courcelle A, Pronyaev V and Van der Marck S C *Nucl Data sheets* 107 2931–3060

16. Aliev F K, Alimov G R, Muminov A T, Osmanov B S and Skvortsov V V 2005 Simulation of experiment on total external reflection of electron bremsstrahlung *Tech Phys.* 50 1053–7.

17. Mordasov N G, Ivashchenko D M, Chlenov A M and Astakhov A A 2004 Simulation of methods for a rapid determination of the energy spectrum of bremsstrahlung from electron accelerators *Tech Phys.* 49 1213–20