

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение  
 Отделение контроля и диагностики

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы  |
|--|
| <b>Разработка виртуального комплекса досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов</b> |

УДК 620.179.152:004.353:351.746.1

Студент

| Группа | ФИО                            | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|------|
| 1БМ71  | Конюшков Константин Алексеевич |         |      |

Руководитель ВКР

| Должность                          | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------------------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД | Осипов С. П. | К.Т.Н.                 |         |      |

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность   | ФИО               | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------|-------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН | Подопригора И. В. | К.Э.Н.                 |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО              | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Дашковский А. Г. |                        |         |      |

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОКД       | Федоров Е. М. | К.Т.Н.                 |         |      |

*Планируемые результаты обучения*

| Код<br>результата | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)  | Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон  |
|-------------------|--|---|
| Р1                | Применять навыки эффективной индивидуальной и командной работы, включая руководство командой, работу по междисциплинарной тематике с учетом этики и корпоративных интересов, в том числе и на иностранном языке. | Требования ФГОС (ОК-3, ОПК- 1, ОПК-3, ПК-12, ПК-16, ПК-17, ПК-18, ПК-22), ), СУОС ТПУ (УК-1, УК-3, УК-4, УК-5, УК-6), CDIO Syllabus (2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.2, п. 2.3, п. 2.4, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса, 19.032 Специалист по диагностике газотранспортного оборудования, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами) |
| Р2                | Применять навыки управления разработкой и производством продукции на всех этапах ее жизненного цикла с учетом инновационных рисков коммерциализации проектов, в том числе в нестандартных ситуациях.             | Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОПК-1, ПК-6, ПК -8, ПК-16, ПК-18, ПК-19, ПК-20), СУОС ТПУ (УК-2, УК-6), CDIO Syllabus (2.1, 2.4, 2.5, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.3, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 29.006 Специалист по проектированию систем в корпусе, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)   |
| Р3                | Собирать, хранить, обрабатывать, использовать, представлять и защищать информацию при соблюдении требования информационной безопасности и корпоративной культуры.  | Требования ФГОС (ОК-1, ПК-4, ПК-17, ПК-19), СУОС ТПУ (УК-5, УК-6), CDIO Syllabus (1.1, 2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI , требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса)  |

| Код<br>результата | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)  | Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон   |
|-------------------|--|--|
| Р4                | Применять навыки планирования, подготовки, проведения теоретических и экспериментальных исследований, а также представления и интерпретации полученных результатов.            | Требования ФГОС (ОПК-1, ОПК-2, ПК-1, ПК-2, ПК-15, ПК-17), СУОС ТПУ (УК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.1, п.1.2, п.1.4), CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 4.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами)   |
| Р5                | Разрабатывать нормативную, техническую и методическую документацию в области неразрушающего контроля и измерительной техники.  | Требования ФГОС (ПК-3, ПК-9, ПК-11, ПК-17), CDIO Syllabus (1.2, 4.4), Критерий 5 АИОР (п.1.3, п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник)  |
| Р6                | Быть готовым к комплексной профессиональной деятельности при разработке инновационных и эффективных методов и средств измерения и контроля.                                    | Требования ФГОС (ПК-5, ПК-6, ПК-8, ПК-10, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-18, ПК-20, ПК-21, ПК-22), СУОС ТПУ (УК-1), CDIO Syllabus (1.2, 1.3, 2.3, 4.1, 4.4, 4.5), Критерий 5 АИОР (п.1.2, п.1.3, п.1.4, п.1.5, п.1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам) |
| Р7                | Разрабатывать и внедрять энерго и ресурсоэффективные технологические процессы производства приборных систем с использованием высокотехнологичных средств измерения и контроля. | Требования ФГОС (ПК-7, ПК-8, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ПК-14, ПК-21), CDIO Syllabus (1.3, 4.1, 4.2, 4.5, 4.6), Критерий 5 АИОР (п.1.2, п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса, 19.032 Специалист по диагностике газотранспортного оборудования)  |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение контроля и диагностики  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы: \_\_\_\_\_

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)   | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|---|------------------------------------|
| 31.12.2017    | Литературный обзор по теме ВКР  | 15                                 |
| 04.09.2018    | Подготовка оборудования к проведению экспериментов  | 8                                  |
| 11.03.2019    | Изучение методов расчета, программного обеспечения, подготовка материалов к проведению эксперимента | 13                                 |
| 25.03.2019    | Проведение экспериментальных исследований   | 16                                 |
| 15.04.2019    | Анализ результатов экспериментов  | 21                                 |
| 22.04.2019    | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение                                     | 12                                 |
| 29.04.2019    | Социальная ответственность  | 9                                  |
| 13.05.2019    | Заключение  | 6                                  |

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

| Должность                          | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------------------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД | Осипов С. П. | К.Т.Н.                 |         |      |

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

| Должность  | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОКД | Федоров Е. М. | К.Т.Н.                 |         |      |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение  
 Отделение контроля и диагностики

**УТВЕРЖДАЮ:**  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)    (Дата)

Федоров Е. М.  
 (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|                          |
|--------------------------|
| Магистерской диссертации |
|--------------------------|

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО                               |
|--------|-----------------------------------|
| 1БМ71  | Конюшкову Константину Алексеевичу |

Тема работы:

|   |
|---|
| Разработка виртуального комплекса досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов |
|---|

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Утверждена приказом директора (дата, номер) | 11.12.2017 г. №9735/с |
|---|-----------------------|

|  |  |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: |  |
|--|--|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|   |   |
|---|---|
| <b>Исходные данные к работе</b>   | Исходные параметры досмотрового комплекса багажа и ручной клади   |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> | 1. Разработка виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади с функцией идентификации материалов<br>2. Финансовый менеджмент, ресурсо-эффективность и ресурсосбережение<br>3. Социальная ответственность<br>4. Заключение и выводы |

|   |  |
|---|--|
| <b>Перечень графического материала</b>  | Презентация, выполненная в программе MS PowerPoint |
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>   |  |
| <b>Раздел</b>   | <b>Консультант</b>                                 |
| 1. Литературный обзор<br>2. Методы исследования<br>3. Экспериментальная часть<br>4. Заключение                | Осипов Сергей Павлович                             |
| 5. Финансовый менеджмент  | Подопригора Игнат Валерьевич                       |
| 6. Социальная ответственность   | Дашковский Анатолий Григорьевич                    |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>                       |  |
| Математическая модель системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов |  |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность                          | ФИО          | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|------------------------------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД | Осипов С. П. | к.т.н.                    |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                            | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|------|
| 1БМ71  | Конюшков Константин Алексеевич |         |      |

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

Студенту:

|               |                                   |
|---------------|-----------------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                        |
| 1БМ71         | Конюшкову Константину Алексеевичу |

|                            |              |                                  |                 |
|----------------------------|--------------|----------------------------------|-----------------|
| <b>Школа</b>               | <b>ИШНКБ</b> | <b>Отделение школы (НОЦ)</b>     | <b>ОКД</b>      |
| <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> | Информация для выполнения данного раздела взята из нормативно-технических документов, научной литературы, аналитических материалов, научных публикаций для проведения анализа процесса досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов |
| 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 НИИ</i>   | Анализ потенциальных потребителей научного исследования, анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, SWOT-анализ |
| 2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>  | Организационная структура проекта  |
| 3. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i> | Разработка календарного план-графика проведения работ, бюджет научного исследования, формирование бюджета затрат научно – технического исследования              |
| 4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>   | Расчет интегрального показателя эффективности научного исследования  |

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

|  |
|--|
| 1. <i>«Портрет» потребителя результатов НИИ</i>                          |
| 2. <i>Сегментирование рынка</i>  |
| 3. <i>Матрица SWOT</i>   |
| 4. <i>График проведения и бюджет НИИ</i>                                 |
| 5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ</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> |
| Доцент ОСГН      | Подопригора И. В. | к.э.н.                        |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |                                |                |             |
|---------------|--------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                     | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 1БМ71         | Конюшков Константин Алексеевич |                |             |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

|               |                                   |
|---------------|-----------------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                        |
| 1БМ71         | Конюшкову Константину Алексеевичу |

|                            |              |                                  |                 |
|----------------------------|--------------|----------------------------------|-----------------|
| <b>Школа</b>               | <b>ИШНКБ</b> | <b>Отделение (НОЦ)</b>           | <b>ОКД</b>      |
| <b>Уровень образования</b> | Магистратура | <b>Направление/специальность</b> | Приборостроение |

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

|  |   |
|--|---|
| 1. Характеристика объекта исследования   | Помещение с естественной вентиляцией воздуха, расположенное на 2 этаже, 2-х этажного производственного корпуса. В помещении расположено оборудование: 2 компьютера. Площадь помещения составляет: 15 м <sup>2</sup> . |
| 2. Отбор законодательных и нормативных документов по теме  | Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.  |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:   |   |
| <b>1. Анализ вредных факторов</b>  | Перечень вредных факторов:<br>– электромагнитное излучение от компьютера<br>– общая система<br>– нормы микроклимата   |
| <b>2. Анализ опасных факторов</b>  | Перечень опасных факторов:<br>– электрический ток   |
| <b>3. Охрана окружающей среды:</b>   | – Анализ воздействия объекта на атмосферу<br>– Утилизация компьютерной техники  |
| <b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>   | Возможные ЧС при разработке<br>– возникновение возгорания (пожар) в помещении   |
| <b>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и социальной защиты работников на предприятии:</b> | Организация и соблюдение общих требований охраны труда при работе за ПК. Социальная защита пострадавших на производстве.  |

|  |  |
|--|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику |  |
|--|--|

**Задание выдал консультант:**

|                  |                 |                               |                |             |
|------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b> | <b>ФИО</b>      | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Доцент ООД       | Дашковский А.Г. | к.т.н.                        |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |                                |                |             |
|---------------|--------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                     | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 1БМ71         | Конюшков Константин Алексеевич |                |             |

## Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 109 страниц, 6 рисунков, 18 таблиц, 58 источников, 4 приложений, одной презентации.

Ключевые слова: досмотровый комплекс багажа и ручной клади, рентгеновское излучение; цифровая радиография, распознавание материалов, метод дуальных энергий, эффективный атомный номер, массовая толщина, разрешение по эффективному атомному номеру, сэндвич-детекторы.

Объект исследования – комплексы для досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов.

Предмет исследования – методы численного моделирования исходных цифровых радиографических изображений и их трансформации в изображения параметра распознавания в досмотровых комплексах контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий.

Цель работы – разработать виртуальный комплекс досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов.

Разработана математическая модель виртуального комплекса досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией идентификации материалов на базе высокопроизводительной модификации метода дуальных энергий, основанной на однократном сканировании объекта контроля пучком рентгеновского излучения с регистрацией фотонов линейкой сэндвич-детекторов. Методом численного моделирования исследовано влияние основных параметров досмотрового комплекса на качество распознавания материалов.

Степень внедрения: результаты исследований реализованы в виде виртуального комплекса досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов и используются в учебном процессе для иллюстрации возможностей метода дуальных энергий.

Область применения: рентгеновский досмотровый контроль багажа и ручной клади.

Экономическая эффективность и практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного программного симулятора для научного обоснования проектирования систем досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов, исходя из технических заданий, сформулированных заказчиками.

## Список сокращений и обозначений

### *Сокращения*

МДЭ – метод дуальных энергий

ОК – объект контроля

РЧП – радиационно-чувствительный преобразователь

РИ – рентгеновское излучение

ЦР – цифровая радиография

ПРИ – первичные радиографические изображения

ИРИ – источник рентгеновского излучения

АС – аналоговый сигнал

ЦС – цифровой сигнал

РРИ – регистратор рентгеновского излучения

ЛРРИ – линейный РРИ

РОП – радиационно-оптический преобразователь

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ФП – фотопреобразователь

КД – комбинированный детектор

ДПП – детектор прямого преобразования

СД – сэндвич-детектор

СПД – спектральный детектор

ПФ – промежуточный фильтр

ТО – тестовый объект

МКО – массовый коэффициент ослабления излучения

ДК – досмотровый комплекс

ПР – параметр распознавания

ПК – персональный компьютер

ЧС – чрезвычайная ситуация

НРБ – нормы радиационной радиографии

### Обозначения

$Z$  – эффективный атомный номер материала

$\rho$  – плотность материала

$A, B$  – параметры метода дуальных энергий

$Q$  – параметр идентификации в способе линий уровней

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

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

$\mu$  – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения

$m$  – массовый коэффициент ослабления гамма-излучения

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

$E$  – энергия фотонного излучения

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

$E_{\text{max}}$  – максимальная энергия рентгеновского излучения

$f_N(E, E_{\text{max}})$  – числовой энергетический спектр

$dN/dE$  – распределение числа фотонов по энергии

$dI/dE$  – распределение интенсивности по энергии

$F(x)$  – фокусное расстояние, расстояние от излучающей точки для точки детектирования с координатой  $x$

$E_{\text{ab}}(E)$  – энергия, переданная зарегистрированным фотоном, радиационно-чувствительному преобразователю

$h_L$  – толщина РЧП, регистрирующего преимущественно «мягкую» составляющую РИ

$h_H$  – толщина РЧП, регистрирующего преимущественно «жёсткую» составляющую РИ

$h_f$  – толщина промежуточного фильтра

$Z_f$  – эффективный атомный номер материала ПФ

$\rho_f$  – плотность материала ПФ

## Нормативные ссылки

1. СанПиН 2.6.1.3488-17 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при обращении с лучевыми досмотровыми установками»
2. Приказ ФТС России от 21.12.2010 N 2509 (ред. от 15.05.2014) «Об утверждении перечня и порядка применения технических средств таможенного контроля в таможенных органах Российской Федерации»
3. Приказ ФТС России Министерства финансов Российской Федерации от 7 декабря 2018 г. N 2000 «Об определении типа технических средств для проведения радиационного контроля, типа досмотровой рентгеновской техники, критериев принятия решений об их необходимости и количестве на территории склада временного хранения»
4. Письмо Центра специальной техники Федеральной Службы Безопасности Российской Федерации №16/УНТР/2-3243 от 26.10.2010
5. Письмо Центра специальной техники Федеральной Службы Безопасности Российской Федерации №16/УНТР/1-2258 от 03.07.2013
6. РД 78.36.003.2002 «Инженерно-техническая укрепленность»
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 июля 2018 года N 886 «Требования по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требования к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающие уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств воздушного транспорта»
8. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»
9. СанПиН О. 2.2. 4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах»
10. СанПиН 2.2.4.1191-03 "Электромагнитные поля в производственных условиях"

11. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»
12. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»
13. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
14. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
15. ГОСТ Р 56222-2014 Ресурсосбережение. Обращение с отходами.
16. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение .....  | 16 |
| 1 Обзор литературы, выбор цели исследований и постановка задач .....  | 22 |
| 2 Математическая модель системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов .....                         | 28 |
| 2.1 Структура досмотрового комплекса багажа и ручной клади и схема сканирования объектов контроля.....  | 28 |
| 2.2 Исходные параметры математической модели досмотрового комплекса багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов .....           | 30 |
| 2.3 Математическая модель формирования первичных радиографических изображений в СДК багажа и ручной клади в режиме МДЭ .....                  | 31 |
| 2.4 Математическая модель трансформации первичных радиографических изображений в изображения параметра распознавания .....                    | 35 |
| 3 Алгоритм и программа численного моделирования системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов ..... | 39 |
| 3.1 Алгоритм численного моделирования системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов .....           | 39 |
| 3.2 Программа численного моделирования системы досмотрового контроля багажа и ручной клади на основе сэндвич детекторов .....                 | 41 |
| 4 Результаты моделирования.....   | 53 |
| 4.1 Вариация параметра $n_0$ .....  | 53 |
| 4.2 Вариация максимальной энергии источника рентгеновского излучения ..   | 54 |
| 4.3 Вариация разрядности АЦП .....  | 55 |
| 4.4 Вариации параметров сэндвич-детектора.....  | 56 |
| 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....   | 58 |
| 5.1 Предпроектный анализ. Потенциальные потребители результатов исследования .....  | 58 |
| 5.2 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....   | 63 |
| 5.3 Планирование управления научно – техническим проектом .....   | 65 |
| 5.4 Бюджет научного исследования .....  | 69 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 5.5 | Организационная структура проекта .....  | 73  |
| 5.6 | Формирование бюджета затрат научно – технического исследования.....  | 74  |
| 6   | Социальная ответственность .....   | 76  |
| 6.1 | Анализ вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды.....                                    | 76  |
| 6.2 | Охрана окружающей среды .....  | 81  |
| 6.3 | Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....  | 82  |
| 6.4 | Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и социальной защиты работников на предприятии..... | 83  |
| 6.5 | Социальная защита пострадавших на производстве .....   | 84  |
|     | Заключение .....   | 87  |
|     | Список публикаций студента .....   | 88  |
|     | Список использованных источников .....   | 89  |
|     | Приложение А .....   | 95  |
|     | Приложение Б.....  | 106 |
|     | Приложение В .....   | 107 |
|     | Приложение Г .....   | 108 |

## Введение

Для обеспечения транспортной, экономической и национальной безопасности во всех странах мира широко используются технические средства досмотрового контроля на основе источников низкоэнергетического и высокоэнергетического рентгеновского излучения (РИ). Низкоэнергетические источники рентгеновского излучения (ИРИ) с максимальной энергией до 450 кэВ используются для досмотрового контроля объектов с небольшими габаритами: багаж; ручная кладь; международные почтовые отправления. Высокоэнергетические источники РИ с максимальной энергией от 1 МэВ до 10 МэВ являются составной частью досмотровых комплексов, предназначенных для контроля крупногабаритных объектов: транспортных средств с грузами и без; авиационных, железнодорожных и морских контейнеров; грузовых вагонов и цистерн. В настоящее время высокими темпами развиваются методы и реализующие их средства для исследования багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля (ОК) и их структурных фрагментов. Здесь под распознаванием материалов понимается отнесение материалов по параметру распознавания (ПР) к одному из классов материалов. В качестве ПР выступает либо эффективный атомный номер (ЭАН), либо некоторая функция от него. Распознавание материалов базируется на методе дуальных энергий (МДЭ). Системы досмотрового контроля (СДК) с функцией распознавания материалов, как правило, имеют меньшую производительность по сравнению с системами без функции распознавания материалов. Но возможное уменьшение производительности компенсируется возможностью обнаружения ОК (фрагментов ОК) не указанных в сопроводительных документах или запрещённых к перевозке. В последние десятилетия существенно возросла необходимость в проектировании СДК багажа и ручной клади с улучшенными потребительскими параметрами. Под потребительскими параметрами СДК понимаются её характеристики как системы цифровой радиографии (ЦР) (контраст, пространственное разрешение,

производительность), дополненные разрешением по ЭАН. Разрешение по ЭАН характеризует способность СДК достоверно распознавать фрагменты с отличающимися эффективными атомными номерами. Численно величина разрешения по ЭАН равна минимальной разности между ЭАН распознаваемых раздельно материалов. Отмеченная выше необходимость в проектировании СДК багажа и ручной клади с улучшенными потребительскими параметрами обусловлена негативными тенденциями, связанными с ростом международного терроризма, распространением наркотиков и т.п. Уверенность в возможности же создания таких систем подкрепляется появлением на рынке новых источников и регистраторов рентгеновского излучения образцов с улучшенными характеристиками. Следует также отметить в качестве положительного фактора – рост теоретических и экспериментальных исследований, связанных с разработкой и совершенствованием алгоритмов распознавания материалов в различных реализациях МДЭ.

Основным подходом к проектированию систем досмотрового контроля багажа и ручной клади, как и других приборных систем, является подход, основанный на объединении укрупнённых элементов системы. К основным укрупнённым элементам СДК относятся ИРИ и регистратор рентгеновского излучения (РРИ). Исходя из конечных параметров СДК, указанных в техническом задании на проектирование, должны быть подобраны ИРИ и ИТИ. В последние годы уменьшилась роль натурного моделирования на стадии проектирования СДК, что связано с огромными материальными затратами на покупку укрупнённых элементов. Значимость этих материальных затрат исключает принципиальную возможность варьирования компонентами СДК с целью рационального подбора элементов. Из сказанного выше можно сделать вывод о превалировании подхода к проектированию СДК, основанного на разработке соответствующих математических и численных моделей формирования исходной радиографической информации, трансформации её в изображения параметров МДЭ и параметра распознавания. Достоинством такого подхода является возможность исследования способом численного

моделирования влияния на качество распознавания материалов методом дуальных энергий всех параметров ИТИ, ИРИ, ОК и геометрической схемы контроля. Конечный продукт исследований будет представлять собой виртуальный комплекс досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов.

Очевидно, что виртуальный комплекс досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов позволит провести все необходимые вычислительные эксперименты для подтверждения технической реализуемости задач проектирования и обеспечить корректный выбор и оценку параметров систем досмотрового контроля.

Сказанное выше подтверждает **актуальность** темы диссертационных исследований.

**Целью работы** является разработка виртуального комплекса досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов.

**Объекты исследования** – комплексы для досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов.

**Предмет исследования** – методы численного моделирования исходных цифровых радиографических изображений и их трансформации в изображения параметра распознавания в досмотровых комплексах контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий.

Для достижения цели, сформулированной выше, необходимо решить следующие **основные задачи**:

1) Разработать математическую модель виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов.

2) Разработать алгоритм и программу для численного моделирования исходных радиографических изображений, последовательной трансформации их в изображения параметров метода дуальных энергий и изображения

параметра распознавания в досмотровых комплексах багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов.

3) Провести ряд численных экспериментов с целью иллюстрации и подтверждения работоспособности предложенных моделей, алгоритмов и программ и их пригодности для обоснования задач проектирования анализируемых досмотровых комплексов.

**Научная новизна диссертации** заключается в следующем:

1) Разработана математическая модель виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов.

2) Разработан алгоритм и программа численного моделирования исходных радиографических изображений, последовательной трансформации их в изображения параметров метода дуальных энергий и изображения параметра распознавания в досмотровых комплексах багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов.

3) Проведён ряд численных экспериментов и на основе анализа их результатов подтверждена работоспособность предложенных моделей, алгоритмов и программ, а также оценена их пригодности для обоснования задач проектирования анализируемых досмотровых комплексов.

**Практическая значимость** работы заключается в возможности использования разработанного программного симулятора для научного обоснования проектирования систем досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов, исходя из технических заданий, сформулированных заказчиками, а также в учебном процессе при проведении занятий по радиационным методам контроля.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы: методы интерполяции и экстраполяции; методы аппроксимации; методы математического и численного моделирования; методы решения систем

алгебраических и интегрально – параметрических уравнений; методы обработки экспериментальных данных; методы теории вероятностей и математической статистики.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1) Математическая модель виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов.

2) Алгоритм и программа численного моделирования исходных радиографических изображений, последовательной трансформации их в изображения параметров метода дуальных энергий и изображения параметра распознавания в досмотровых комплексах багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов.

3) Подтверждение работоспособности предложенных моделей, алгоритмов и программ, а также оценка их пригодности для обоснования задач проектирования анализируемых досмотровых комплексов.

**Достоверность и обоснованность** полученных в работе результатов обеспечена корректным использованием математического аппарата и основных положений взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, а также их согласованностью с результатами, полученными другими исследователями. В программной реализации разработанных алгоритмов численного моделирования и анализе результатов численных экспериментов применялось лицензированное программное обеспечение.

**Личный вклад автора** заключается в создании алгоритма для численного моделирования системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов и ее реализации в системе для математических вычислений – Mathcad.

**Реализация результатов работы.** Результаты выполненных исследований использованы в рекомендациях по выбору источников и регистраторов рентгеновского излучения в системах досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов

контроля и их структурных фрагментов. Рекомендации основаны на анализе результатов вычислительных экспериментов, проведённых с использованием разработанного алгоритма и реализующей его программы численного моделирования.

**Апробация работы.** Материалы, вошедшие в предлагаемую диссертацию, обсуждались на отчетах по НИР отделения контроля и диагностики ИШНКБ в 2017 – 2019 годах и докладывались на трёх международных конференциях:

– XIX Международная научно – техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация» 23 мая 2018, г. Барнаул (Диплом I степени);

– VII Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» 8 – 13 октября 2018, г. Томск (Диплом III степени);

– Международная научно–техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC – 2018) 19 – 23 ноября 2018, г. Москва (Диплом лауреата конкурсной программы).

**Публикации.** По теме выпускной квалификационной работы опубликовано 3 статьи.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, шести основных глав, заключения, списка используемых источников, включающего 58 источников. Объём диссертации составляет 109 страниц машинописного текста, 6 рисунков и 18 таблиц.

## 1 Обзор литературы, выбор цели исследований и постановка задач

Во введении отмечено, что для обеспечения безопасности пассажирских перевозок, пресечения провоза запрещённых или не указанных в декларации изделий широко применяются рентгеновские системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов и их структурных фрагментов [1, 2]. Для осуществления функции распознавания материалов используется метод дуальных энергий (МДЭ) в различных его реализациях [1–5] и обобщениях (метод мульти-энергий – ММЭ, спектрометрическая реализация ММЭ).

Параметром распознавания в МДЭ и ММЭ является эффективный атомный номер  $Z$  [4, 5] или непрерывная монотонная гладкая функция от ЭАН  $q(Z)$ . Существует два варианта описания условий монотонности и гладкости функции  $q(Z)$  (вариант  $a$  и вариант  $b$ )

$$\begin{aligned} \forall Z, Z_0 \in [1, 92], \lim_{Z \rightarrow Z_0^-} q(Z) = \lim_{Z \rightarrow Z_0^+} q(Z) = q(Z_0), \\ \lim_{Z \rightarrow Z_0^-} q'(Z) = \lim_{Z \rightarrow Z_0^+} q'(Z) = q'(Z_0), \end{aligned} \quad (1)$$

|     |               |
|-----|---------------|
| $a$ | $q'(Z) > 0$   |
| $b$ | $q'(Z) < 0$ . |

Соблюдение одного из вариантов (1)  $a$  или  $b$  на всём разумном интервале изменения ЭАН  $Z$  – от 1 (водород) до 92 (уран) обуславливает существование функции  $q^{-1}(Q)$ , здесь  $Q$  – экспериментально измеренное значение параметра распознавания. В этом случае из первичного параметра распознавания материала  $Q$  всегда может быть оценён главный параметр распознавания – эффективный атомный номер  $Z$ .

Всю совокупность модификаций МДЭ можно разделить по одному из нескольких классифицирующих признаков. Наиболее важными из них являются два. Первый классифицирующий признак – способ получения исходной информации, второй – способ обработки исходной информации.

*Способ получения исходной информации.* Известны несколько модификаций МДЭ по этому классифицирующему признаку, среди которых

можно выделить две модификации. В первой модификации МДЭ объект контроля сканируется пучками РИ с двумя специальным образом подобранными максимальными энергиями излучения [4, 6]  $E_L$  и  $E_H$ ,  $E_L < E_H$ . Выше отмечено, что указанное неравенство означает большую жёсткость РИ с максимальной энергией  $E_H$  по сравнению с максимальной энергией  $E_L$ . В англоязычной литературе принято называть  $E_L$  Low Energy, а  $E_H$  – High Energy. Здесь и ниже будем ассоциировать индекс  $L$  с Low Energy, а индекс  $H$  – High Energy. Максимальные энергии рентгеновского излучения  $E_L$  и  $E_H$  подбираются таким образом, чтобы преобладающим эффектом взаимодействия фотонов с меньшей энергией (Low Energy) с веществом являлся фотоэффект, а для фотонов с большей энергией (High Energy) – эффект Комптона. С такого разделения (две энергии – два эффекта взаимодействия фотонов с веществом) и начинался классический МДЭ, разработанный Маковски, Альваресом, Бруксом, Ди Чиро и другими. Для ИРИ непрерывного действия два необходимых исходных радиографических изображения  $J_L$  и  $J_H$  могут быть получены сканированием вначале вперёд, а затем назад. Для импульсного ИРИ изображения  $J_L$  и  $J_H$  могут быть сформированы двукратным сканированием ОК, либо однократным сканированием, но со строго периодическим чередованием импульсов с максимальными энергиями  $E_L$  и  $E_H$ . Во второй модификации МДЭ объект контроля сканируется пучком РИ с одной максимальной энергией  $E_{max}$  с регистрацией излучения специальным сэндвич детектором (СД) [6–8]. Сэндвич-детектор состоит из двух детекторов, радиационно-чувствительные преобразователи (РЧП) которых разделены промежуточным фильтром [7, 8]. Сэндвич-детектор осуществляет мягкую дискриминацию (разделение) РИ по энергии. В первом детекторе регистрируется преимущественно мягкая составляющая энергетического спектра рентгеновского излучения, а во втором детекторе – преимущественно жёсткая составляющую РИ. Фильтр предназначен для ещё большего ужесточения излучения. Вне зависимости от режима излучения в ИРИ (непрерывный или импульсный) в реализации МДЭ на основе сэндвич-

детекторов два первичных радиографических изображения (ПРИ) ОК формируются за одно сканирование. Это является важным достоинством для конечных потребителей ИДК с распознаванием материалов ОК или структурных фрагментов. Дальнейшее развитие МДЭ связывают с отдельной регистрацией излучения в различных энергетических окнах [9], что делает обязательным применение сэндвич-детекторов, но приводит к необходимости использования ПРИ с непрерывным режимом излучения. Такое совершенствование ИДК является материально затратным, но сам метод дуальных энергий становится более информативным.

*Способ обработки исходной информации.* Существует несколько модификаций МДЭ, отличающихся по способу обработки исходной информации (ПРИ) и по конечному оцениваемому параметру. Метод дуальных энергий рассматривается как метод распознавания материалов. Напомним, что под распознаванием конкретного материала понимается отнесение его к одному из нескольких классов материалов по некоторому параметру распознавания. Выше отмечено, что в качестве ПР выступает ЭАН материала ОК  $Z$  либо некоторая функция  $q(Z)$ , связанная с ним. С каждым из классов распознавания в практическом применении МДЭ в досмотровом контроле сопоставляют эталонный материал. Сопоставление того или иного класса распознавания с тем или иным материалом, определяется интересами потребителя и, не в последнюю очередь, технологичностью изготовления фрагментов тестового объекта (ТО) из него. Именно из эталонных материалов изготавливают фрагменты ТО, которые необходимы на этапе калибровки ИДК и разработки или корректировки алгоритмов обработки ПРИ. Количество эталонных материалов и соответствующих им классов распознавания материалов определяется технической реализуемостью задачи проектирования ИДК багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов. Следует отметить, что тестовый объект является наравне с ПРИ, РТИ и алгоритмами формирования и обработки информации неотъемлемой частью ИДК. В настоящее время при проектировании ИДК выдвигается задача распознавания

материалов ОК из нескольких групп органических материалов, нескольких групп неорганических материалов и нескольких групп металлов. В современных модификациях ИДК с функцией распознавания материалов в результате обработки ПРИ одновременно оценивается массовая толщина ОК и ЭАН его материала [10–13]. Для распознавания материалов продолжает широко применяться способ линий уровней [12, 13] и способ, основанный на оценке ЭАН ОК  $Z$  [14–16]. Все три способа обладают своими ограничениями, областями применения, достоинствами и недостатками. Оценка ЭАН является достаточно сложна в реализации, так как нуждается либо в высокоточной информации относительно ПРИ и РТИ, в либо в организованных сложным образом ТО [17–19].

В статье [20] подробно рассмотрены обобщённые критерии адекватности моделей высокоэнергетических инспекционных досмотровых комплексов с функцией распознавания крупногабаритных объектов контроля. Отметим, что указанные критерии могут быть использованы и для ИДК багажа и ручной клади с поправкой на низкую энергию рентгеновского излучения (до 450 кэВ). В работе [21] кратко описана математическая модель систем досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов и их структурных фрагментов.

Из анализа информационных источников следует, что реализация метода дуальных энергий, основанная на разделении преимущественно «мягкого» и преимущественно «жёсткого» рентгеновского излучения, осуществляемого радиационно-чувствительными элементами сэндвич-детекторов, продолжает интересовать заказчиков низкоэнергетических СДК с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов [22–23]. Отмеченный интерес обуславливается высокой скоростью контроля и приемлемым, на данный момент, уровнем качества распознавания, а также появлением на рынке научного оборудования регистраторов рентгеновского излучения, позволяющих повысить информативную способность анализируемых систем досмотрового контроля.

В современных подходах к проектированию систем досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов широко используются методы численного моделирования, базирующиеся на соответствующих математических моделях формирования первичных радиографических изображений в методе дуальных энергий с последующей их последовательной трансформацией в изображения МДЭ и изображения параметра распознавания. Разрабатываемые математические модели должны учитывать значимые параметры источника и регистратора рентгеновского излучения, объекта контроля и геометрической схемы контроля. Математическая модель СДК с функцией распознавания материалов должна допускать вариацию всех параметров модели, учитывать максимально большее число физических и технических закономерностей формирования исходной радиографической информации и трансформации её в изображения, предназначенный для анализа внутреннего содержания ОК по выбранному параметру распознавания. Разрабатываемая математическая модель должна быть преобразована в алгоритм численного моделирования с последующей его реализацией в программу для численного моделирования анализируемой системы досмотрового контроля. Отмеченную программу можно назвать виртуальным комплексом досмотрового контроля [24–27].

Из сказанного выше вытекает необходимость разработки виртуального комплекса досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов. Указанная разработка и является **целью диссертационных исследований**.

Из предыдущего анализа научной литературы можно сделать вывод о том, что для достижения упомянутой цели исследований нужно решить цикл задач, среди которых наиболее значимыми являются:

– разработка математической модели виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов;

– разработка алгоритма и программы для численного моделирования исходных радиографических изображений, последовательной трансформации их в изображения параметров метода дуальных энергий и изображения параметра распознавания в досмотровых комплексах багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов;

– проведение ряда численных экспериментов с целью иллюстрации и подтверждения работоспособности предложенных моделей, алгоритмов и программ и их пригодности для обоснования задач проектирования анализируемых досмотровых комплексов.

## **2 Математическая модель системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов**

В этом разделе будет рассмотрена математическая модель системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов ОК. В основу способа распознавания положена реализация метода дуальных энергий, базирующаяся на регистрации рентгеновского излучения многоканальными линейными детекторами, каждый детектор представляет собой сэндвич-детектор. Специфика СД связана с его конструкцией, которая позволяет разделить РИ на преимущественно мягкую и преимущественно жёсткую составляющие [28–29].

Разрабатываемая математическая модель состоит из ряда основных блоков и базируется на описании структуры анализируемой СДК и геометрической схемы формирования первичных радиографических изображений (схемы сканирования).

### **2.1 Структура досмотрового комплекса багажа и ручной клади и схема сканирования объектов контроля**

Анализируемый досмотровый комплекс в соответствии с современным агрегатным подходом к проектированию состоит нескольких основных частей: регистратора рентгеновского излучения (Приложение В); источника рентгеновского излучения (Приложение Г); алгоритмов и программ формирования и обработки информации.

Более детальная структура анализируемого типа СДК и соответствующая геометрическая схема сканирования объекта контроля приведена на рисунке 1. Система досмотрового контроля багажа и ручной клади состоит из источника рентгеновского излучения 4 с защитой от излучения 1 и щелевым коллиматором 5, линейного детектора 3, транспортёра для перемещения контролируемого объекта 2 со световыми датчиками для извещения системы о вхождении объекта 7 в зону контроля 6. На рисунке 1

цифрой 8 выделен участок ОК для формирования пары столбцов (радиографические изображения с индексами  $L$  и  $H$ ) из радиографических изображений ОК. Первичные радиографические изображения  $J_L$  и  $J_H$  формируются методом непрерывного сканирования всего объекта. Индексу  $L$  соответствует изображение, полученное с ближайшего к ИРИ детектора сэндвича, а индексу  $H$  – с дальнего детектора сэндвича. «Бегущее» изображение (изображения) отражается (отображаются) на экране монитора (мониторов). Отметим, что ПРИ  $J_L$  и  $J_H$  могут обрабатываться алгоритмом обработки информации в МДЭ по соответствующим парам столбцов. Это приводит к повышению производительности СДК.

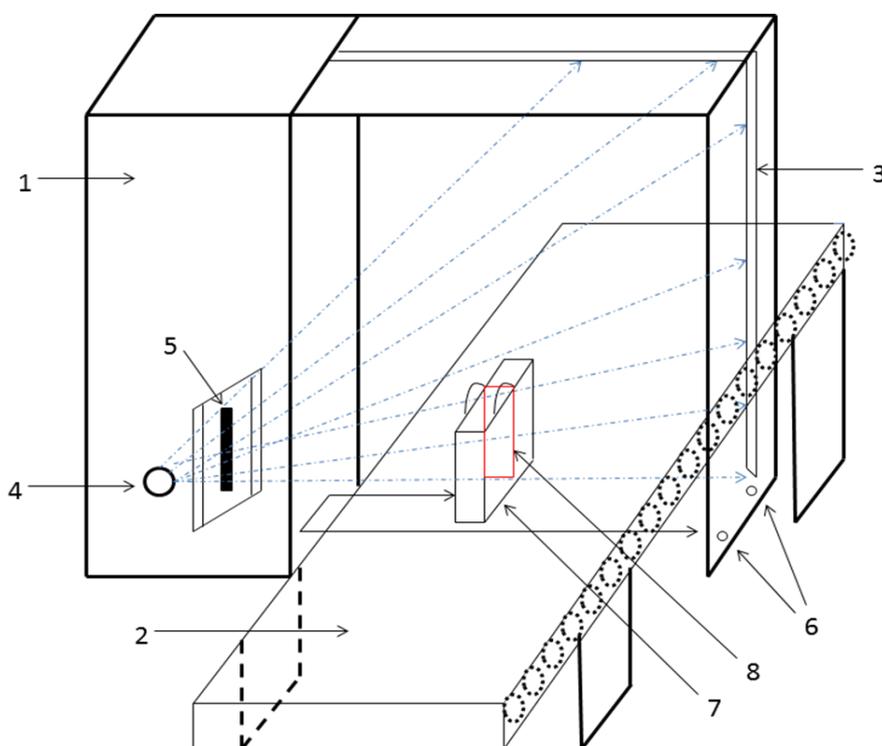


Рисунок 1 – Геометрическая схема контроля:

1 – корпус с защитой; 2 – транспортер; 3 – линейный детектор; 4 – источник излучения; 5 – щелевой коллиматор; 6 – световые датчики; 7 – объект контроля; 8 – просвечиваемый участок для формирования пары столбцов изображения объекта

Следует отметить, что для удобства работы операторов систем и повышения вероятности обнаружения фрагментов, запрещённых к перевозке, предусмотрен стационарный режим анализа ПРИ и изображений параметра

распознавания с возможностью повторного сканирования с режимами, позволяющими более детально исследовать внутреннюю структуру объекта.

Центры детекторов в РТИ могут располагаться по прямой линии, Г-образно (рисунок 1) и по дуге окружности. Наиболее рационально расположение детекторов по дуге окружности.

## **2.2 Исходные параметры математической модели досмотрового комплекса багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов**

Выше отмечено, что основными элементами СДК с функцией распознавания материалов являются ИРИ и РРИ. Существенное влияние на качество распознавания оказывают также параметры геометрической схемы сканирования. Выбор параметров ИРИ и РРИ определяется объектом контроля [30–34].

Единственным возможным типом источника ионизирующего излучения применительно к рассматриваемой задаче является рентгеновский аппарат. Гипотетически возможно использование радионуклидов – источников гамма-излучения, но нормы радиационной безопасности выдвигают жёсткие требования к защите. Выше отмечено, что

Перечислим параметры разрабатываемой математической модели.

*Источник рентгеновского излучения:*

- режим излучения – непрерывный или импульсный;
- максимальная энергия рентгеновского излучения –  $E_{\max}$ ;
- числовой энергетический спектр  $f(E, E_{\max})$ ;
- высоковольтное напряжение  $U$  и ток  $i$ ;
- интенсивность потока фотонов на расстоянии 1 метр от источника излучения –  $N_0$ ;
- эффективный атомный номер материала мишени ИРИ –  $Z$ .

Ещё одной характеристикой ИРИ является угловое распределение излучения, но для максимальных энергий РИ до 450 кэВ в первом приближении можно считать изотропным.

*Регистраторы рентгеновского излучения:*

- режим регистрации – интегральный, счётный или спектрометрическая реализация счётного метода;
- тип регистратора – комбинированный (сцинтилляционный + ФП), прямого преобразования;
- поперечные размеры ФП –  $a_d \times b_d$ ;
- эффективный атомный номер, плотность материала и толщина  $L$ -детектора сэндвича –  $Z_L, \rho_L, h_L$ ;
- эффективный атомный номер, плотность материала и толщина промежуточного фильтра сэндвича –  $Z_F, \rho_F, h_F$ ;
- эффективный атомный номер, плотность материала и толщина  $H$ -детектора сэндвича –  $Z_H, \rho_H, h_H$ ;
- разрядности АЦП  $L$ - и  $H$ -детекторов сэндвича –  $k_L$  и  $k_H$ ;
- время формирования одной пары столбцов радиографических изображений –  $T$ ;
- средние уровни и среднеквадратические отклонения темновых сигналов для  $L$ - и  $H$ -детекторов сэндвича –  $\Phi_L, \sigma_L$  и  $\Phi_H, \sigma_H$ .

Остановимся на дуговидном РРИ.

*Геометрическая схема сканирования:*

- расстояние от центра излучающей поверхности ИРИ до дуги РРИ;
- длина дуги РРИ –  $L_x$ .

### **2.3 Математическая модель формирования первичных радиографических изображений в системах досмотрового контроля багажа и ручной клади в режиме дуальных энергий**

Основой математической модели любой из реализаций систем ЦР или компьютерной томографии (КТ) является модель формирования первичных РИ

или проекций. Метод дуальных энергий по своей сути является двух-энергетической цифровой радиографией [35–37]. Остановимся подробнее на описании математической модели формирования первичных радиографических изображений в СДК багажа и ручной клади в режиме МДЭ.

На первом этапе необходимо сделать ряд важных допущений.

*Первое допущение.* Пусть сэндвич-детекторы расположены по дуге с центром в излучающей точке (радиус дуги  $F$ ). Подчеркнём, что подобное допущение позволит существенно упростить разрабатываемую математическую модель. Числовой нормированный энергетический спектр источника рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_{\max}$  описывается функцией  $f(E, E_{\max})$

$$\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) dE = 1. \quad (2)$$

Энергетический спектр  $f(E, E_{\max})$  приближается различными формулами для малых (формула Крамерса) и высоких максимальных энергий ИРИ (формула Шиффа) [38–40]. В силу общих физических закономерностей формирования рентгеновского и тормозного излучения на основе торможения ускоренных пучков электронов в материале мишени для описания  $f(E, E_{\max})$  могут быть использованы похожие формулы.

*Второе допущение.* Расстояние от источника рентгеновского излучения до детекторов  $F$  (фокусное расстояние) велико по сравнению с толщинами РЧП –  $F \gg (h_L \wedge h_H)$ ; поперечные размеры ФП существенно меньше фокусного расстояния –  $(a_d \wedge b_d) \ll F$ .

Число фотонов  $n(E)$  с энергией  $E$ , попадающих на фронтальную поверхность сэндвич-детектора за время  $T$  с учётом указанных допущений оценивается по формуле:

$$n(E) = \frac{N_0 T a_d b_d}{F^2} f(E, E_{\max}) = n_0 f(E, E_{\max}). \quad (3)$$

Из анализа выражения (3) следует, что в соответствии с введённым определением  $n_0$  является обобщённым параметром, численно равным

интегральному количеству фотонов, попадающих на фронтальную поверхность сэндвич-детектора за время  $T$ . Введение параметра  $n_0$  существенно уменьшает число параметров разрабатываемой математической модели и позволяет, при необходимости, сравнивать различные ПРИ друг с другом для различных геометрических схем формирования ПРИ.

*Третье допущение.* Допустим отсутствие потерь световой энергии в каждом детекторе сэндвича.

В этом случае уравнения связи аналоговых сигналов  $J_L$  и  $J_H$  с параметрами ОК  $(\rho h, Z)$  и варьируемыми параметрами комплекса с учётом шумов имеют вид:

$$\begin{aligned} I_L(\rho H, Z) &= \int_0^{E_{\max}} E_L(E) n(E) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon_L(E) dE + \Phi_L(\rho H, Z) \\ I_H(\rho H, Z) &= \int_0^{E_{\max}} E_H(E) n^*(E) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon_H(E) dE + \Phi_H(\rho H, Z), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $n^*(E) = n(E) e^{-m(E, Z_L) \rho_L h_L - m(E, Z_F) \rho_F h_F}$ ;

$(E)$ ,  $E_H(E)$  – зависимости среднего значения энергии зарегистрированного фотона в первом и во втором РЧП от энергии фотонов;

$\varepsilon_L(E) = 1 - e^{-m(E, Z_L) \rho_L h_L}$ ,  $\varepsilon_H(E) = 1 - e^{-m(E, Z_L) \rho_L h_L}$  – зависимости эффективности регистрации для первого и второго детекторов сэндвича от энергии;

$m(E, Z)$ ,  $m(E, Z_L)$ ,  $m(E, Z_H)$ ,  $m(E, Z_F)$  – зависимости МКО излучения для материалов ОК, первого и второго РЧП и дополнительного фильтра от энергии;

$\Phi_L$ ,  $\Phi_H$  – шумы для первого и второго детектора СД, которые аддитивно включают в себя и темновые сигналы с детекторов с соответствующими уровнями шумов.

Случайные величины  $\Phi_L$ ,  $\Phi_H$  для интегрального режима регистрации распределены по Гауссу [41] с параметрами  $\xi_L$ ,  $\sigma_L$  и  $\xi_H$ ,  $\sigma_H$

$$\begin{aligned}\xi_L &= \Phi_{DL}, \xi_H = \Phi_{DH}, \\ \sigma_L(\rho H, Z) &= \sqrt{\int_0^{E_m} \overline{E_L^2}(E) n(E) e^{-m(E,Z)\rho H} \varepsilon_H(E) dE}, \\ \sigma_H(\rho H, Z) &= \sqrt{\int_0^{E_{\max}} \overline{E_H^2}(E) n^*(E) e^{-m(E,Z)\rho H} \varepsilon_H(E) dE},\end{aligned}\quad (5)$$

где  $\overline{E_L^2}(E)$ ,  $\overline{E_H^2}(E)$  – средние значения квадрата энергии зарегистрированного фотона с энергией  $E$  в первом и во втором РЧП;

$\Phi_{DL}$ ,  $\sigma_L$  и  $\Phi_{DH}$ ,  $\sigma_H$  – средние уровни темновых сигналов. Предполагается, что темновые сигналы распределены по усечённому закону Гаусса с параметрами  $\Phi_{DL}$ ,  $\sigma_{DL}$  и  $\Phi_{DH}$ ,  $\sigma_{DH}$ .

Выражения (3)–(5) являются основой математической модели формирования первичных виртуальных радиографических изображений в СДК багажа и ручной клади в режиме МДЭ, могут быть трансформированы в алгоритм имитационного моделирования и программу, представляющую собой виртуальный комплекс досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов, так как позволяют осуществить численную имитацию процесса формирования аналоговых сигналов [42].

Для этого вычисляются первые слагаемые в системе (4), а значения случайных величин  $\Phi_L$ ,  $\Phi_H$  могут быть разыграны по формулам [26]:

$$\begin{aligned}\Phi_L(\rho H, Z) &= \sqrt{-2 \ln \zeta_1} \cos(2\pi\zeta_2) \sigma_L(\rho H, Z) + \sqrt{-2 \ln \zeta_1} \sin(2\pi\zeta_2) \sigma_{DL} + \Phi_{DL}, \\ \Phi_H(\rho H, Z) &= \sqrt{-2 \ln \zeta_3} \cos(2\pi\zeta_4) \sigma_H(\rho H, Z) + \sqrt{-2 \ln \zeta_3} \sin(2\pi\zeta_4) \sigma_{DL} + \Phi_{DL},\end{aligned}\quad (6)$$

где  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$  – случайные (псевдослучайные) величины, распределённые равномерно на интервале (0,1).

Подпрограммы для розыгрыша таких случайных величин имеются во всех языках программирования и системах для математических вычислений, например, в MathCad – встроенная функция rnd(1).

Аналоговые сигналы с выхода фотоприёмника  $I_L$  и  $I_H$  поступают на вход АЦП, в котором трансформируются в цифровые сигналы  $D_L$  и  $D_H$

$$D_L(\rho H, Z) = \text{int} \left( \frac{I_L(\rho H, Z)}{\Delta_L} \right), D_H(\rho H, Z) = \text{int} \left( \frac{I_H(\rho H, Z)}{\Delta_H} \right), \quad (7)$$

где  $\Delta_L, \Delta_H$  – величины аналоговых сигналов для детекторов сэндвича, соответствующие единице цифрового сигнала.

В простейшем случае  $\Delta_L = \Delta_H = \Delta$ . Отметим, что детекторы сэндвича могут быть оснащены АЦП с различной разрядностью –  $k_L, k_H$ . Значения  $\Delta_L, \Delta_H$  связаны с разрядностями АЦП  $k_L, k_H$  соотношениями:

$$\Delta_L = \frac{C_L I_L(\rho_{air} H_{air}, Z_{air})}{2^{k_L} - 1}, \Delta_H = \frac{C_H I_H(\rho_{air} H_{air}, Z_{air})}{2^{k_H} - 1}, \quad (8)$$

здесь индекс *air* относится к измерениям ослабления воздухом; коэффициенты  $C_L > 1, C_H > 1$  вводятся для защиты АЦП от переполнения.

Дополнение (6)–(8) к математической модели формирования первичных виртуальных радиографических изображений в СДК багажа и ручной клади в режиме МДЭ превращает её в полноценную модель формирования цифровых радиографических изображений МДЭ [43].

## 2.4 Математическая модель трансформации первичных радиографических изображений в изображения параметра распознавания

В любой из реализаций метода дуальных энергий откалиброванные по «чёрному» и по «белому» цифровые сигналы  $D_L$  и  $D_H$  поступают на вход специализированного алгоритма, основной целью которого является оценка параметра распознавания материала ОК  $p$ . Существует несколько подходов к распознаванию материалов.

Система (4) состоит из двух интегральных параметрических уравнений относительно двух параметров ОК – массовой толщины  $\rho H$  и эффективного атомного номера  $Z$ . Указанные параметры могут быть получены непосредственно из системы уравнений (4). В этом подходе в качестве параметра распознавания  $p$  выступает оценка эффективного атомного номера  $Z$ ,  $p = Z$ . Ограничением такого подхода является недостаточная гладкость двумерной функции  $m(E, Z)$  относительно  $Z$ .

Наиболее распространённым к распознаванию материалов ОК является подход, основанный на использовании в качестве параметра распознавания  $p$  отношения  $Q$  оценок толщин ОК в длинах свободного пробега  $D_L$  и  $D_H$  для преимущественно «мягкой» и преимущественно «жёсткой» составляющих рентгеновского излучения

$$Q = \frac{\ln(D_L/D_{L0})}{\ln(D_H/D_{H0})} = \frac{Y_L}{Y_H}, \quad (9)$$

где  $D_{L0}$  и  $D_{H0}$  – цифровые сигналы с первого и второго детекторов СД без ОК.

Параметр распознавания  $p=Q$  зависит от максимальной энергии  $E_{\max}$ , массовой толщины ОК  $\rho H$  и эффективного атомного номера  $Z$ .

Вне зависимости от физической интерпретации параметра распознавания практические реализации способов распознавания основаны на стадии калибровочных испытаниях специально организованных тестовых объектов (ТО). Тестовые объекты состоят из фрагментов с параметрами  $(\rho H, Z)$  из зоны потребительского интереса. Предварительно формируются экспериментальные зависимости  $Y_L(\rho H, Z)$  и  $Y_H(\rho H, Z)$ .

Содержание следующего этапа алгоритма обработки информации зависит от подхода к оценке параметра распознавания  $p$ .

#### 2.4.1 Параметр распознавания $p=Z$

В этом случае экспериментальные зависимости  $Y_L(\rho H, Z)$  и  $Y_H(\rho H, Z)$  трансформируются в непрерывные гладкие монотонные по  $\rho H$  и  $Z$  калибровочные функции  $F_L(\rho H, Z)$  и  $F_H(\rho H, Z)$ . Определение неизвестных  $\rho H$  и  $Z$  сводится к приравниванию калибровочных функций к соответствующим экспериментальным оценкам толщин ОК в д.с.п. и решению системы уравнений:

$$\begin{aligned} F_L(\rho H, Z) &= Y_L \\ F_H(\rho H, Z) &= Y_H \end{aligned} \quad (10)$$

Соблюдение требований непрерывности, гладкости и строгой монотонности функций  $F_L(\rho H, Z)$  и  $F_H(\rho H, Z)$  обеспечивает существование и единственность решения системы уравнений (10) относительно  $\rho H$  и  $Z$ .

Распознавание материалов, сводящееся к соотнесению к одному из классов, происходит по оценке принадлежности оценки  $Z$  к одному из интервалов изменения эффективного атомного номера, соответствующего классу материалов.

#### 2.4.2 Параметр распознавания $p=Q$

В этом случае экспериментальные зависимости  $Y_L(\rho H, Z)$  и  $Y_H(\rho H, Z)$ , полученные в результате испытаний ТО, преобразуются в набор калибровочных функций  $Q(Y_L) = Y_L(\rho H, Z) / Y_H(\rho H, Z)$ .

Упомянутый набор формируется для всей совокупности уровней  $Z$ , с каждым уровнем  $Z_i$ ,  $i=1 \dots i_0$  ассоциируются свой класс распознаваемых материалов. Здесь  $i_0$  – количество распознаваемых классов. По набору калибровочных функций  $Q_i(Y_L)$ ,  $i \leftrightarrow Z_i$ ,  $i=1 \dots i_0$  строится набор функций уровней  $Q_{i-}(Y_L)$  и  $Q_{i+}(Y_L)$ . Естественное выдвинуть требование к функциям уровней

$$\forall i \in (1, i_0) \wedge \forall j \in (1, i_0), i \neq j \Rightarrow (Q_{i-}(Y_L), Q_{i+}(Y_L)) \cap (Q_{j-}(Y_L), Q_{j+}(Y_L)). \quad (11)$$

Выражение (11) представляет собой правило отнесения материала испытуемого объекта (фрагмента) к некоторому классу материалов.

Отметим, что функции  $Q_i(Y_L)$  должны быть предварительно перенумерованы по возрастанию. В интервалах изменения  $Y_L$ , в которых нарушается порядок возрастания функций, корректно распознать материал невозможно.

Ограничение (11) может быть дополнено ещё одним ограничением, которое позволяет сделать заключение о неопределённости распознаванию материалов. Это ограничение описывается соотношением:

$$\forall i \in (1, i_0 - 1), j = i + 1 \Rightarrow (Q_{i-}(Y_L), Q_{i+}(Y_L)) \cup (Q_{j-}(Y_L), Q_{j+}(Y_L)) \neq (Q_{i-}(Y_L), Q_{j+}(Y_L)). \quad (12)$$

Материал относится к классу, ассоциированному с эффективным атомным номером  $Z_i$ , если выполняется следующее ограничение:

$$Q_{ex} \in (Q_{i-}(Y_L), Q_{i+}(Y_L)). \quad (13)$$

Для высокоэнергетического рентгеновского излучения ( $E_m > 2$  МэВ) и классической реализации МДЭ (формирование радиографических изображений для двух максимальных энергий) доказано существование интервалов массовой толщины, для которых невозможно корректное (однозначное) распознавание материалов ОК методом линий уровней [18].

Аналогичные интервалы существуют и для рентгеновского излучения с  $E_m < 400$  кэВ, в том числе для анализируемой реализации МДЭ. Ожидается, что в исследуемой реализации МДЭ в отличие от классической реализации введение предварительной фильтрации рентгеновского излучения не приведет к расширению диапазона массовых толщин с надёжным распознаванием материалов.

Существует альтернатива правилу (13) отнесения материала испытуемого объекта (фрагмента) к некоторому классу материалов. Материал по альтернативному правилу относится к классу  $i$ , если выполняется следующее соотношение:

$$\min_{j=1 \dots i} |Q_{ex} - Q_j(Y_L)| = |Q_{ex} - Q_i(Y_L)|. \quad (14)$$

Правило, базирующееся на соотношении (14) не требует дополнительного определения функций уровней, поэтому проще в практической реализации.

Совокупность выражений (1)–(14) представляет собой математическую модель системы досмотрового комплекса багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов методом дуальных энергий на основе разделения преимущественно «мягкой» и преимущественно «жёсткой» составляющих рентгеновского излучения, осуществляемого элементами сэндвич-детектора.

### **3 Алгоритм и программа численного моделирования системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов**

#### **3.1 Алгоритм численного моделирования системы досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов**

Описанная в предыдущем разделе математическая модель является основой алгоритма численного (имитационного) моделирования системы багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов ОК и их структурных фрагментов методом дуальных энергий.

Алгоритм можно разделить на несколько базовых этапов.

1) Этап формирования предварительной информации. На этом этапе вводятся таблицы массовых коэффициентов ослабления гамма-излучения с энергиями от 1 кэВ до 20 МэВ для материалов с атомным номером от 1 до 92 [19]. На основе табличных зависимостей задаются интерполирующие функции  $m(E,Z)$  для вычисления МКО для любой энергии фотонов.

2) Определение функций  $I_L(E,Z)$  и  $I_H(E,Z)$ . Для максимальной общности указанных функций в список аргументов вводятся все необходимые параметры досмотрового комплекса.

3) Функции  $I_L(E,Z)$  и  $I_H(E,Z)$  после предварительного задания  $\Delta_L$ ,  $\Delta_H$  трансформируются в функции  $D_L(E,Z)$  и  $D_H(E,Z)$ .

4) Задание исходных данных. Параметры инспекционного досмотрового комплекса с функцией распознавания материалов:

а) ОК –  $(\rho H)_{\min}$ ,  $(\rho H)_{\max}$ ,  $Z_{\min}$ ,  $Z_{\max}$ ; число фотонов, попадающих на фронтальную поверхность СД за время измерения без ОК, –  $n_0$ ;

б) максимальная энергия источник рентгеновского излучения –  $E_{\max}$ ; сэндвич-детектор –  $Z_L$ ,  $Z_H$ ,  $\rho_L h_L$ ,  $\rho_H h_H$ ,  $Z_F$ ,  $\rho_F h_F$ ;

в) разрядность АЦП –  $k$  [44].

5) Задание тестового объекта (дискретного набора пар  $(\rho H, Z)$ ) и определение калибровочных функций  $F_L(\rho H, Z)$  и  $F_H(\rho H, Z)$ , если  $p=Z$ , или калибровочных функций  $Q(Y_L)=Y_L(\rho H, Z)/Y_H(\rho H, Z)$ , если  $p=Q$ .

б) Формирование исходных виртуальных радиографических изображений объекта контроля  $I_L$  и  $I_H$  с трансформацией их в цифровые виртуальные радиографические изображения  $D_L$  и  $D_H$ .

7) Преобразование изображений  $D_L$  и  $D_H$  в виртуальное изображение параметра распознавания  $P$ . Изображение  $P$  для случая  $p=Z$  дополняется изображением  $R$  – массовой толщины  $\rho H$ , а для  $p=Q$  в качестве изображения  $R$  выбирается одно из изображений  $Y_L$  или  $Y_H$  – изображения толщины ОК в д.с.п. для преимущественно мягкой и преимущественно жёсткой составляющих рентгеновского излучения.

8) Трансформация в цветное изображение  $R_C$  полутонового изображения  $R_G$ , полученного из виртуального изображения  $R$ . Изображение  $R_G$  раскрашивается в соответствии с изображением  $P$ , правилом соотнесения материалов к классам распознавания и выбранной палитрой. Яркость цвета определяется либо толщиной ОК или его фрагмента в д.с.п., либо массовой толщиной.

Алгоритм численного (имитационного) моделирования, разработанный на основе предложенной математической модели, с учётом разбиения на этапы естественным образом реализуется в программный продукт в системе для математических вычислений MathCad. Итоговый программный продукт является искомым виртуальным досмотровым комплексом с функцией распознавания материалов. Для удобства практического использования этапы алгоритма объединены в блоки и оформлены в виде подпрограмм с параметрами.

## 3.2 Программа численного моделирования системы досмотрового контроля багажа и ручной клади на основе сэндвич детекторов

### Виртуальный комплекс досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов

Число Авогадро –  $NA := 6.023 \cdot 10^{23}$

#### Исходные данные

#### Ввод данных по ослаблению гамма-излучения материалами

$C := \text{READPRN}("82.txt")$       таблица 82.txt находится в директории программы

$i0 := \text{cols}(C) - 1 = 80$

$ZM := \text{READPRN}("ZM.txt")$        $\text{rows}(ZM) = 80$

$j := 0 .. 126$      $i := 0 .. i0 - 1$        $Ze_i := ZM_{i,0}$        $Ze_{79} := 82$

$Mz_i := ZM_{i,1}$        $Mz_{79} := ZM_{79,1}$

Энергии переводится в кэВ, сечения и энергия зарегистрированного фотона ранжируются по возрастанию энергии, сечения пересчитываются в МКО

$$E_j := \frac{C_{126-j,0}}{1000} \quad \mu_{\gamma,i} := \frac{C_{126-j,i+1} \cdot 10^{-24} \cdot NA}{Mz_i}$$

Вычисление коэффициентов сплайнов для МКО       $vcc^{\langle i \rangle} := \text{cspline}(E, \mu_{\gamma}^{\langle i \rangle})$

Задание функций-сплайнов для МКО       $\text{mas}(x, i) := \text{interp}(vcc^{\langle i \rangle}, E, \mu_{\gamma}^{\langle i \rangle}, x)$

Первый детектор сэндвича из CsI       $\rho_{CsI} := 4.51$        $h_{CsI} := 0.25$

Второй детектор сэндвича из Gd2SO2       $\rho_{GdSO} := 7.34$        $h_{GdSO} := 0.05$

Промежуточный фильтр из меди       $\rho_{Cu} := 8.9$        $h_{Cu} := 0.5$

Задание энергетических зависимостей для материалов сэндвич-детектора

$$\mu_{\text{CsI}}(x) := \left( \text{mas}(x, 54) \cdot \frac{Mz_{54}}{Mz_{54} + Mz_{52}} + \text{mas}(x, 52) \cdot \frac{Mz_{52}}{Mz_{54} + Mz_{52}} \right) \cdot \rho_{\text{CsI}}$$

$$\mu_{\text{GdSO}}(x) := \left( \text{mas}(x, 64) \cdot Mz_{64} \cdot 2 + \text{mas}(x, 7) \cdot Mz_7 \cdot 2 + \text{mas}(x, 15) \cdot Mz_{15} \right) \cdot \frac{\rho_{\text{GdSO}}}{(Mz_{64} \cdot 2 + Mz_7 \cdot 2 + Mz_{15})}$$

$$\mu_{\text{Cu}}(x) := \text{mas}(x, 28) \cdot \rho_{\text{Cu}}$$

### Данные для расчётов

Энергетический спектр (формула Крамерса)  $f(\text{emax}, x) := (\text{emax} - x) \cdot \frac{2}{\text{emax}^2}$

Плотности и атомные номера материалов фрагментов объекта контроля

$$\rho := \begin{pmatrix} 2.26 \\ 2.7 \\ 7.86 \\ 6.5 \end{pmatrix} \quad ZC := \begin{pmatrix} 7 \\ 13 \\ 26 \\ 40 \end{pmatrix}$$

### Зависимость интенсивности и потока частиц от параметров ОК с учётом дополнительной фильтрации

Фильтр из меди толщиной hf  $\text{mf}(x) := \text{mas}(x, 28) \quad \rho_f := 8.64$

Ожидаемое число фотонов на фронтальной поверхности детектор при отсутствии ОК  $N_0 := 10^6$

Энергетические зависимости эффективности регистрации для первого и второго детектора сэндвича

$$\epsilon_L(x) := 1 - e^{-\mu_{\text{GdSO}}(x) \cdot h_{\text{GdSO}}} \quad \epsilon_H(x) := 1 - e^{-\mu_{\text{CsI}}(x) \cdot h_{\text{CsI}}}$$

Количество фотонов за объектом контроля (программа функция) для первого детектора сэндвича

$$NL(emax, Z, \rho H) := N0 \cdot \frac{\int_5^{emax} \frac{f(emax, x)}{x} \cdot e^{-mas(x, Z-1) \cdot \rho H} \cdot \epsilon L(x) dx}{\int_5^{emax} \frac{f(emax, x)}{x} dx}$$

Интегральная энергия фотонов за объектом контроля (программа функция) для первого детектора сэндвича

$$IL(emax, Z, \rho H) := NL(emax, Z, \rho H) \cdot \frac{\int_5^{emax} f(emax, x) \cdot e^{-mas(x, Z-1) \cdot \rho H} \cdot \epsilon L(x) dx}{\int_5^{emax} \frac{f(emax, x)}{x} \cdot e^{-mas(x, Z-1) \cdot \rho H} \cdot \epsilon L(x) dx}$$

Ослабление фотонов первым детектором сэндвича и промежуточным фильтром

$$ff(emax, x) := \frac{f(emax, x)}{x} \cdot e^{-\mu_{GdSO}(x) \cdot h_{GdSO} - \mu_{Cu}(x) \cdot h_{Cu}}$$

Количество фотонов за объектом контроля (программа функция) для второго детектора

$$NH(emax, Z, \rho H) := N0 \cdot \frac{\int_5^{emax} ff(emax, x) \cdot e^{-mas(x, Z-1) \cdot \rho H} \cdot \epsilon H(x) dx}{\int_5^{emax} \frac{f(emax, x)}{x} dx}$$

Интегральная энергия фотонов за объектом контроля (программа функция) для второго детектора сэндвича

$$IH(\text{emax}, Z, \rho H) := NL(\text{emax}, Z, \rho H) \cdot \frac{\int_5^{\text{emax}} ff(\text{emax}, x) \cdot e^{-\text{mas}(x, Z-1) \cdot \rho H} \cdot \epsilon H(x) dx}{\int_5^{\text{emax}} \frac{ff(\text{emax}, x)}{x} \cdot e^{-\text{mas}(x, Z-1) \cdot \rho H} \cdot \epsilon H(x) dx}$$

Параметры преобразования аналогового сигнала в цифровой сигнал

Разрядность АЦП  $k := 16$

Коэффициент защиты цифрового сигнала от переполнения  $Co := 1.2$

Интервал дискретизации  $\Delta(\text{emax}) := \frac{Co \cdot \max(IL(\text{emax}, 1, 0), IH(\text{emax}, 1, 0))}{(2^k - 1)}$

Максимальные энергии рентгеновского излучения  $em := 250$

Калибровочные измерения по ступенчатым клиньям

Количество шагов по массовой толщине  $nr := 200$

Количество шагов по эффективному атомному номеру  $nz := 3$

Максимальная массовая толщина  $\rho h_{\max} := 6$

Шаг по толщине  $h := \frac{\rho h_{\max}}{nr}$

$ip := 0..nr$   $ii := 0..nz$

$\rho h_{ip} := 0. + h ip$   $\Delta D := \Delta(em)$

Таблицы виртуальных аналоговых сигналов и количеств фотонов для первого и второго детекторов сэндвича

$IL_{ip, ii} := IL(em, ZC_{ii}, \rho h_{ip})$

$N1_{ip, ii} := NL(em, ZC_{ii}, \rho h_{ip})$

$$I2_{i\rho, ii} := IH(em, ZC_{ii}, \rho h_{i\rho})$$

$$N2_{i\rho, ii} := NH(em, ZC_{ii}, \rho h_{i\rho})$$

Коэффициенты сплайн интерполяции всех зависимостей

$$vI1^{(ii)} := cspline(\rho h, I1^{(ii)})$$

$$vI2^{(ii)} := cspline(\rho h, I2^{(ii)})$$

$$vN1^{(ii)} := cspline(\rho h, N1^{(ii)})$$

$$vN2^{(ii)} := cspline(\rho h, N2^{(ii)})$$

Сплайны для асех зависимостей

$$\Pi1(y1, ii) := \text{interp}(vI1^{(ii)}, \rho h, I1^{(ii)}, y1)$$

$$\Pi2(y1, ii) := \text{interp}(vI2^{(ii)}, \rho h, I2^{(ii)}, y1)$$

$$NN1(y1, ii) := \text{interp}(vN1^{(ii)}, \rho h, N1^{(ii)}, y1)$$

$$NN2(y1, ii) := \text{interp}(vN2^{(ii)}, \rho h, N2^{(ii)}, y1)$$

Оцифровка виртуальных аналоговых сигналов

$$ID1_{i\rho, ii} := \text{floor}\left(\frac{I1_{i\rho, ii}}{\Delta D}\right) \quad ID2_{i\rho, ii} := \text{floor}\left(\frac{I2_{i\rho, ii}}{\Delta D}\right)$$

$$i\rho := 0..n\rho - 1$$

Вычисление оценок толщины объектов контроля в длинах свободного пробега для преимущественно мягкого и преимущественно жёсткого рентгеновского излучения для АЦП с бесконечной разрядностью

$$Y1_{i\rho, ii} := -\ln\left(\frac{I1_{i\rho+1, ii}}{I1_{0, ii}}\right) \quad Y2_{i\rho, ii} := -\ln\left(\frac{I2_{i\rho+1, ii}}{I2_{0, ii}}\right)$$

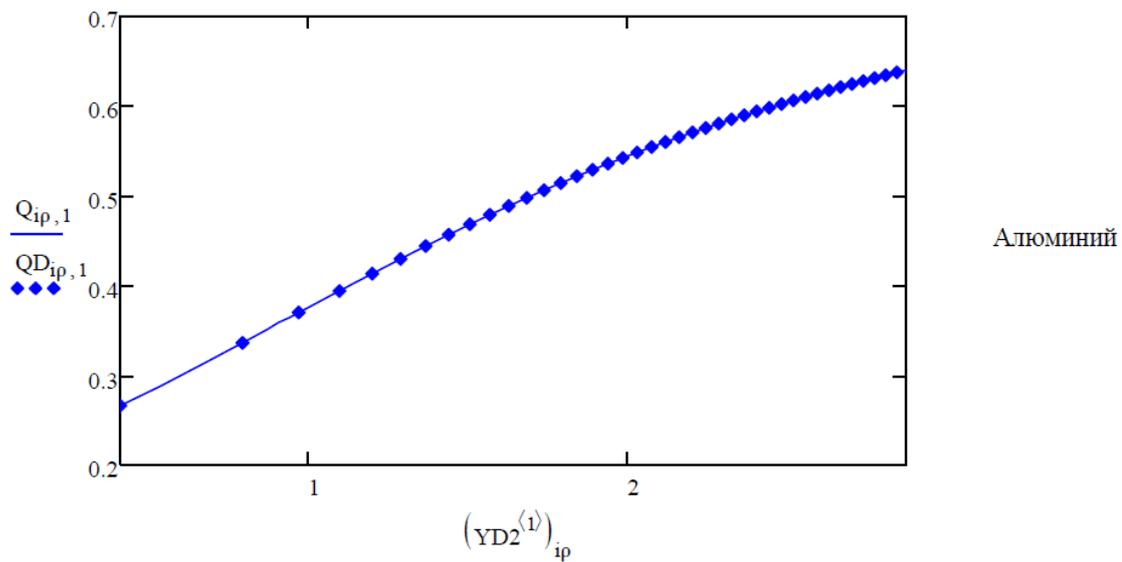
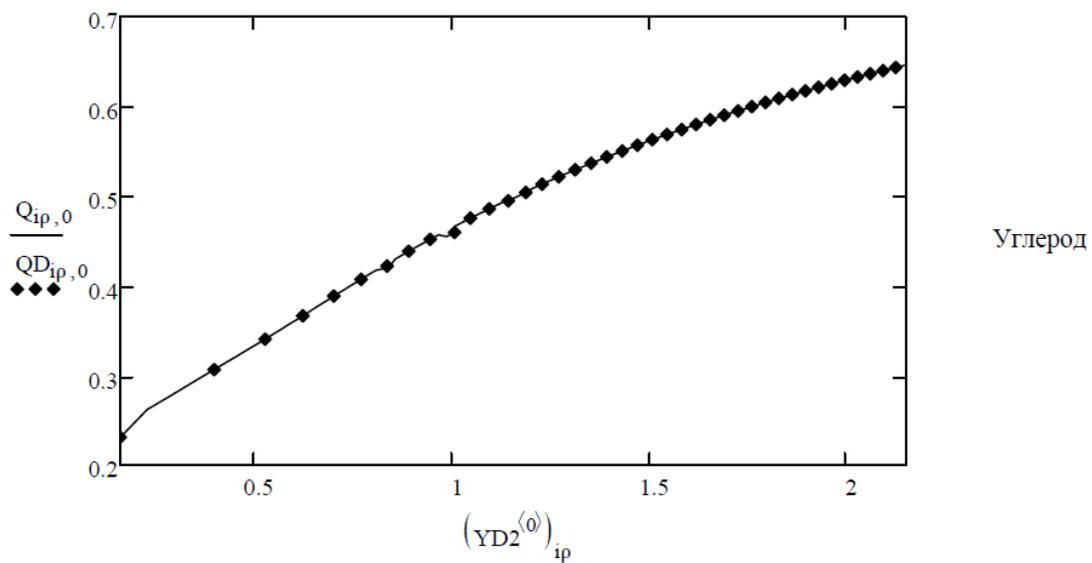
Вычисление оценок толщины объектов контроля в длинах свободного пробега для преимущественно мягкого и преимущественно жёсткого рентгеновского излучения для АЦП с ограниченной разрядностью

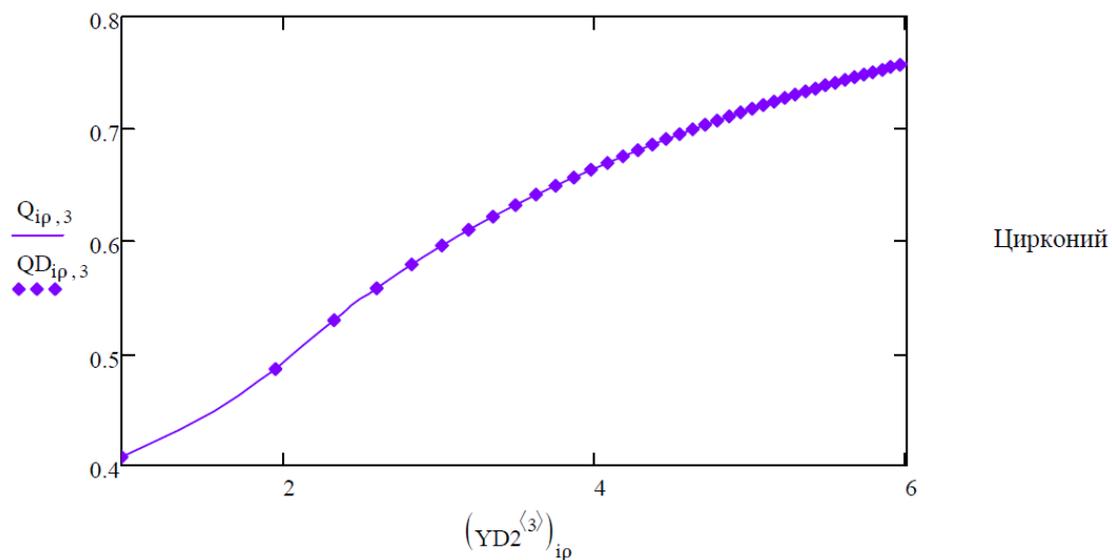
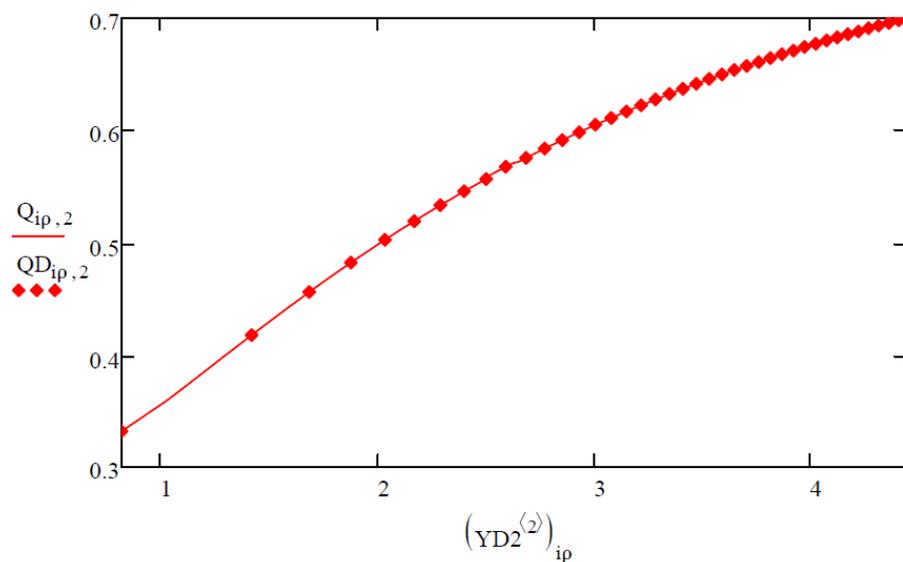
$$YD1_{i\rho, ii} := -\ln\left(\frac{ID1_{i\rho+1, ii}}{ID1_{0, ii}}\right) \quad YD2_{i\rho, ii} := -\ln\left(\frac{ID2_{i\rho+1, ii}}{ID2_{0, ii}}\right)$$

Вычисление оценок параметра распознавания для АЦП с бесконечной (Q) и ограниченной разрядностью (QD)

$$Q_{ip,ii} := \frac{Y1_{ip,ii}}{Y2_{ip,ii}} \quad QD_{ip,ii} := \frac{YD1_{ip,ii}}{YD2_{ip,ii}}$$

Иллюстрация расходимости аналитических и цифровых оценок параметра распознавания для всех материалов фрагментов тестовых объектов





Вычисление коэффициентов сплайн интерполяции для зависимости параметра распознавания от оценки толщины ОК для жёсткой составляющей рентгеновского излучения (второй детектор сэндвича)

$$vQ^{(ii)} := \text{cspline}(Y2^{(ii)}, Q^{(ii)})$$

Зависимость параметра распознавания от оценки толщины ОК для жёсткой составляющей рентгеновского излучения (второй детектор сэндвича)

$$QQ(y2, ii) := \text{interp}(vQ^{(ii)}, Y2^{(ii)}, Q^{(ii)}, y2)$$

$$ii := 0..nz + 1$$

Иллюстрация линий уровней

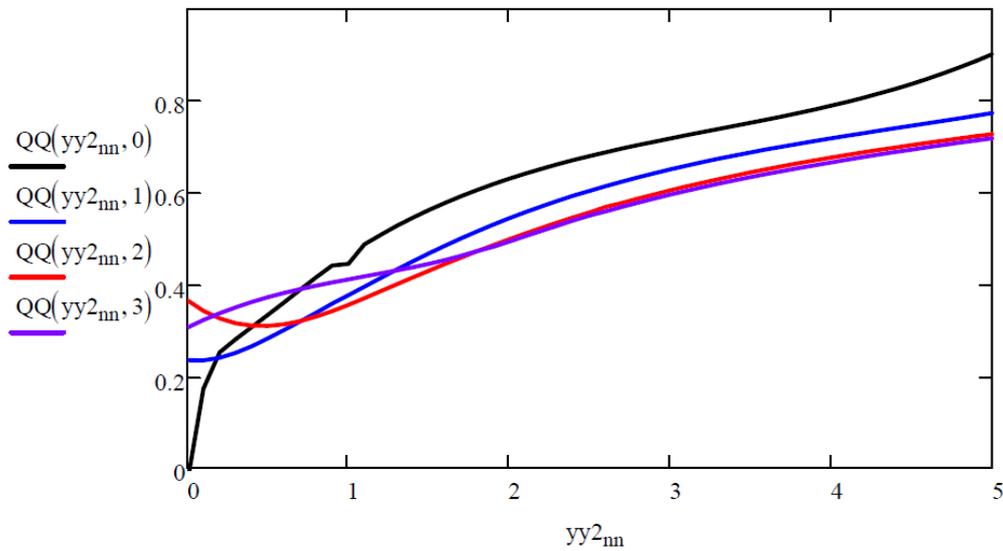
$$my2 := 5$$

$$m0 := 50$$

$$hy := \frac{my2}{m0}$$

$$m := 0..m0$$

$$yy2_m := hy \cdot m$$



Размеры модельного изображения объекта с клиновидными фрагментами

$$\rho_{Hmin} := 0.5$$

$$\rho_{Hmax} := 5$$

$$NX := 640$$

$$NY := 840$$

$$yC := 20$$

$$yAl := 220$$

$$yFe := 420$$

$$yAg := 620$$

$$xC := 20$$

$$xAl := 20$$

$$xFe := 20$$

$$xAg := 20$$

$$AC := 620$$

$$AAl := 620$$

$$AFe := 620$$

$$AAg := 620$$

$$BC := 200$$

$$BAI := 400$$

$$BFe := 600$$

$$BAg := 800$$

$$ix := 0..NX \quad iy := 0..NY \quad h_{\text{mm}} := \frac{\rho_{H\text{max}} - \rho_{H\text{min}}}{AC - xC}$$

Описание профиля фрагментов по массовой толщине

$$\rho_{H_{ix, iy}} := \begin{cases} h \cdot (ix - xC) & \text{if } xC \leq ix \leq AC \wedge yC \leq iy \leq BC \\ h \cdot (ix - xAl) & \text{if } xAl \leq ix \leq AAl \wedge yAl \leq iy \leq BA1 \\ h \cdot (ix - xFe) & \text{if } xFe \leq ix \leq AFe \wedge yFe \leq iy \leq BFe \\ h \cdot (ix - xAg) & \text{if } xAg \leq ix \leq AAg \wedge yAg \leq iy \leq BAg \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Коэффициент защиты от логарифмирования отрицательных чисел и нуля

$$\alpha := 0.00010$$

Моделирование изображения для первого детектора сэндвича

$$ID11_{ix, iy} := \begin{cases} buC \leftarrow xC \leq ix \leq AC \wedge yC \leq iy \leq BC \\ buAl \leftarrow xAl \leq ix \leq AAl \wedge yAl \leq iy \leq BA1 \\ buFe \leftarrow xFe \leq ix \leq AFe \wedge yFe \leq iy \leq BFe \\ buAg \leftarrow xAg \leq ix \leq AAg \wedge yAg \leq iy \leq BAg \\ \left\lfloor \frac{\Pi1(\rho_{H_{ix, iy}, 0}) \cdot \max\left[\alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN1}(\rho_{H_{ix, iy}, 0})}}\right]}{\Delta D} \right\rfloor & \text{if } buC \\ \left\lfloor \frac{\Pi1(\rho_{H_{ix, iy}, 1}) \cdot \max\left[\alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN1}(\rho_{H_{ix, iy}, 0})}}\right]}{\Delta D} \right\rfloor & \text{if } buAl \\ \left\lfloor \frac{\Pi1(\rho_{H_{ix, iy}, 2}) \cdot \max\left[\alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN1}(\rho_{H_{ix, iy}, 2})}}\right]}{\Delta D} \right\rfloor & \text{if } buFe \\ \left\lfloor \frac{\Pi1(\rho_{H_{ix, iy}, 3}) \cdot \max\left[\alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN1}(\rho_{H_{ix, iy}, 3})}}\right]}{\Delta D} \right\rfloor & \text{if } buAg \\ \left\lfloor \frac{\Pi1(0, 2) \cdot \max\left[\alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN1}(0, 2)}}\right]}{\Delta D} \right\rfloor & \text{otherwise} \end{cases}$$

Моделирование изображения для второго детектора сэндвича

$$\begin{aligned}
 ID22_{ix, iy} := & \left[ \begin{array}{l}
 \text{buc} \leftarrow xC \leq ix \leq AC \wedge yC \leq iy \leq BC \\
 \text{bual} \leftarrow xAl \leq ix \leq AAl \wedge yAl \leq iy \leq BAl \\
 \text{bufe} \leftarrow xFe \leq ix \leq AFe \wedge yFe \leq iy \leq BFe \\
 \text{buAg} \leftarrow xAg \leq ix \leq AAg \wedge yAg \leq iy \leq BAg \\
 \text{floor} \left[ \frac{\Pi 2(\rho H_{ix, iy}, 0) \cdot \max \left[ \alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN} 2(\rho H_{ix, iy}, 0)}} \right]}{\Delta D} \right] \text{ if buc} \\
 \text{floor} \left[ \frac{\Pi 2(\rho H_{ix, iy}, 1) \cdot \max \left[ \alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN} 2(\rho H_{ix, iy}, 1)}} \right]}{\Delta D} \right] \text{ if bual} \\
 \text{floor} \left[ \frac{\Pi 2(\rho H_{ix, iy}, 2) \cdot \max \left[ \alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN} 2(\rho H_{ix, iy}, 2)}} \right]}{\Delta D} \right] \text{ if bufe} \\
 \text{floor} \left[ \frac{\Pi 2(\rho H_{ix, iy}, 3) \cdot \max \left[ \alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN} 2(\rho H_{ix, iy}, 3)}} \right]}{\Delta D} \right] \text{ if buAg} \\
 \text{floor} \left[ \frac{\Pi 2(0, 2) \cdot \max \left[ \alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{md}(1))) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{md}(1))}{\sqrt{\text{NN} 2(0, 2)}} \right]}{\Delta D} \right] \text{ otherwise}
 \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Коэффициент защиты от логарифмирования отрицательных чисел и нуля

$$\eta := 0.0001$$

Коэффициенты для калибровки по белому

$$k0 := 1$$

$$ix := 0 .. NX - k0$$

$$iy := 0 .. NY - k0$$

$$ID1_{ix, iy} := \frac{\sum_{kx=ix}^{ix+k0-1} \sum_{ky=iy}^{iy+k0-1} ID11_{kx, ky}}{k0^2}$$

$$ID2_{ix, iy} := \frac{\sum_{kx=ix}^{ix+k0-1} \sum_{ky=iy}^{iy+k0-1} ID22_{kx, ky}}{k0^2}$$

$$MID1_{ix} := \frac{\sum_{iy=0}^{20-k0} ID1_{ix, iy}}{20 + 1 - k0}$$

$$MID2_{ix} := \frac{\sum_{iy=0}^{20-k0} ID2_{ix, iy}}{20 + 1 - k0}$$

Калибровка по белому и логарифмирование

$$Y1_{ix, iy} := -\ln\left(\frac{\max(\eta, ID1_{ix, iy})}{MID1_{ix}}\right) \quad Y2_{ix, iy} := -\ln\left(\frac{\max(\eta, ID2_{ix, iy})}{MID2_{ix}}\right)$$

Вычисление параметров распознавания

$$Q_{ix, iy} := \begin{cases} 0.1 & \text{if } Y1_{ix, iy} \leq 0.01 \vee Y2_{ix, iy} \leq 0.01 \\ \frac{Y1_{ix, iy}}{Y2_{ix, iy}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Минимальное и максимальное значения оценки ОК для второго детектора сэндвича

$$Y2min := \min(Y2) \quad Y2max := \max(Y2)$$

Полутона раскрашиваемого изображения

$$P_{ix, iy} := 255 - \text{floor}\left(200 \cdot \frac{Y2_{ix, iy} - Y2min}{Y2max - Y2min}\right)$$

Палитра

$$Pal := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 255 & 128 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 255 & 128 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 255 & 128 \end{pmatrix}$$

Цветное изображение (цветные координаты RGB)

$$\begin{pmatrix} rr_{ix, iy} \\ gg_{ix, iy} \\ bb_{ix, iy} \end{pmatrix} := \begin{cases} dQ \leftarrow \min \left( \begin{pmatrix} |Q_{ix, iy} - QQ(Y2_{ix, iy}, 0)| \\ |Q_{ix, iy} - QQ(Y2_{ix, iy}, 1)| \\ |Q_{ix, iy} - QQ(Y2_{ix, iy}, 2)| \\ |Q_{ix, iy} - QQ(Y2_{ix, iy}, 3)| \end{pmatrix} \right) \\ Pal^{(0)} \cdot P_{ix, iy} & \text{if } dQ = |Q_{ix, iy} - QQ(Y2_{ix, iy}, 0)| \\ Pal^{(1)} \cdot P_{ix, iy} & \text{if } dQ = |Q_{ix, iy} - QQ(Y2_{ix, iy}, 1)| \\ Pal^{(2)} \cdot P_{ix, iy} & \text{if } dQ = |Q_{ix, iy} - QQ(Y2_{ix, iy}, 2)| \\ Pal^{(3)} \cdot P_{ix, iy} & \text{if } dQ = |Q_{ix, iy} - QQ(Y2_{ix, iy}, 3)| \\ Pal^{(4)} \cdot 1 & \text{if } Q_{ix, iy} \leq 0.1 \\ Pal^{(5)} \cdot 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

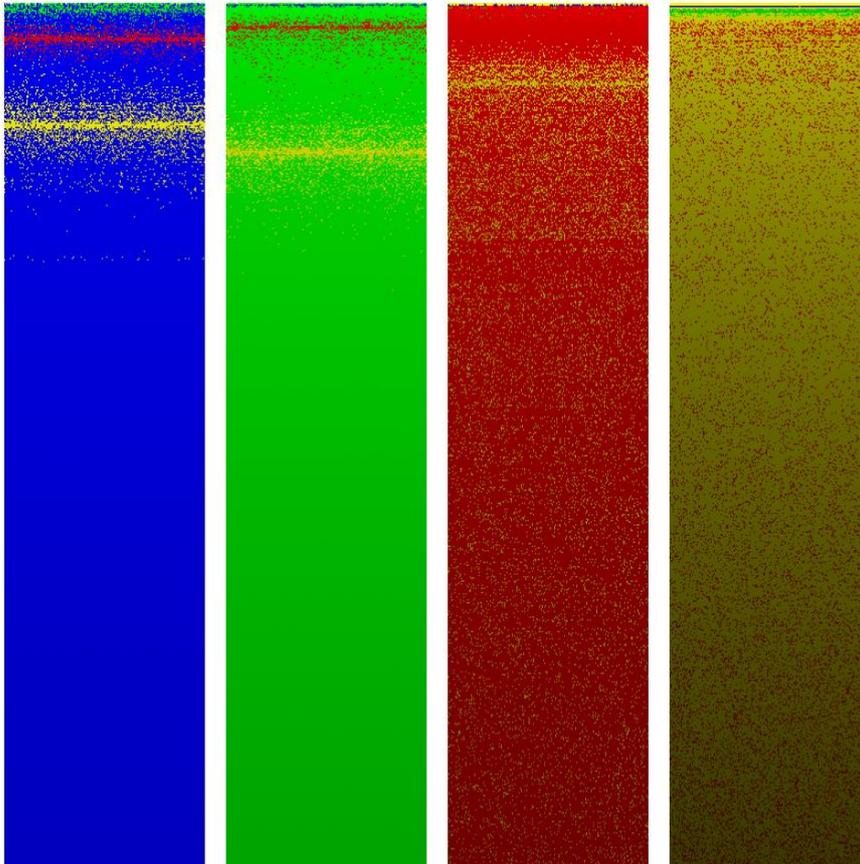
Задание цветного изображения

```
CI2 := augment(rr, gg, bb)
```

Запись в память цветного изображения

```
WRITERGB("IDC1.bmp") := CI2
```

Иллюстрация изображения объекта контроля с распознаванием материалов



"IDC1.bmp"

## 4 Результаты моделирования

Разработанная программа численного моделирования системы досмотрового контроля багажа и ручной клади на основе сэндвич-детекторов позволяет проводить вычислительные эксперименты с вариацией основных параметров системы, с целью проверки адекватности разработанной математической модели реальным условиям и с целью проверки технической достижимости задач проектирования.

В качестве объекта был выбран тестовый объект, состоящий из клиновидных фрагментов из углерода, алюминия, стали и циркония. Система досмотрового контроля характеризовалась следующими параметрами: максимальная энергия рентгеновского излучения  $E_{\max}=120$  кэВ, 160 кэВ, 200 кэВ; 250 кэВ; материал первого детектора сэндвича –  $\text{CdWO}_4$ , толщина –  $h_L=0,5$  мм; материал второго детектора сэндвича –  $\text{CsI}$ , толщина –  $h_H=2,5$  мм; материал промежуточного фильтра –  $\text{Cu}$ , толщина  $h_F=1$  мм;  $n_0=10^5, 10^6, 10^7$ ; массовая толщина фрагментов ОК  $\rho H$  варьировалась от  $0,5$  г/см<sup>2</sup> до  $6$  г/см<sup>2</sup>; разрядность АЦП –  $k=16, 20, 24$ .

В блоке визуализации использовалась следующая палитра: синий – углерод; зелёный – алюминий; красный – железо; жёлтый – цирконий.

### 4.1 Вариация параметра $n_0$

На рисунке 2 приведены изображения параметра распознавания  $Q$  для  $E_{\max}=120$  кэВ,  $k=16$ . Варьировался параметр  $n_0$ .

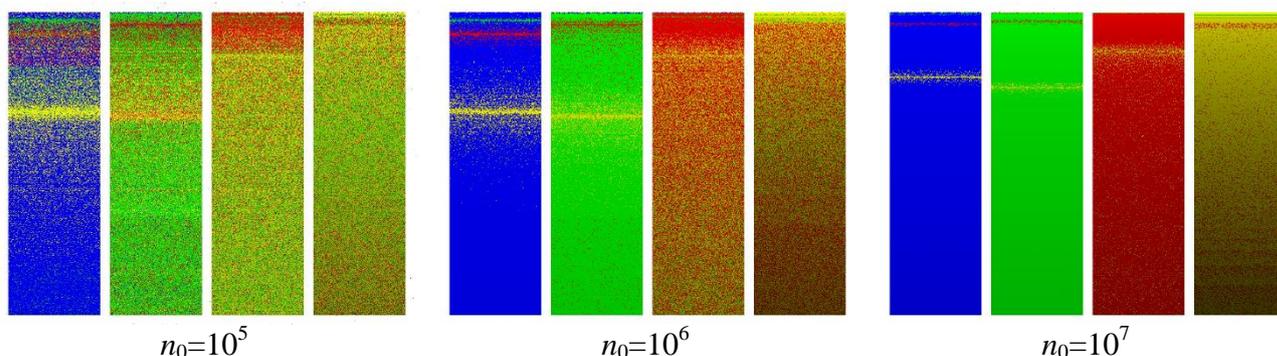


Рисунок 2 – Изображения параметра распознавания  $Q$  для  $E_{\max}=120$  кэВ,  $k=16$ :

■ – углерод; ■ – алюминий; ■ – железо; ■ – цирконий

Из анализа изображений, приведённых на рисунке 2, можно сделать вывод о безусловной значимости параметра  $n_0$ , так как он определяет уровни шумов в изображениях параметра распознавания. Следует также отметить яркую выраженность интервалов массовых толщин с ошибочным распознаванием материалов. Эти интервалы находятся в областях малых значений массовых толщин фрагментов ОК. Для максимальной энергии  $E_{\max}=120$  кэВ цирконий практически неотделим от железа.

#### 4.2 Вариация максимальной энергии источника рентгеновского излучения

На рисунке 3 приведены изображения параметра распознавания  $Q$  для  $k=16$ . Варьировались параметры  $n_0$  и  $E_{\max}=160$  кэВ, 200 кэВ и 250 кэВ.

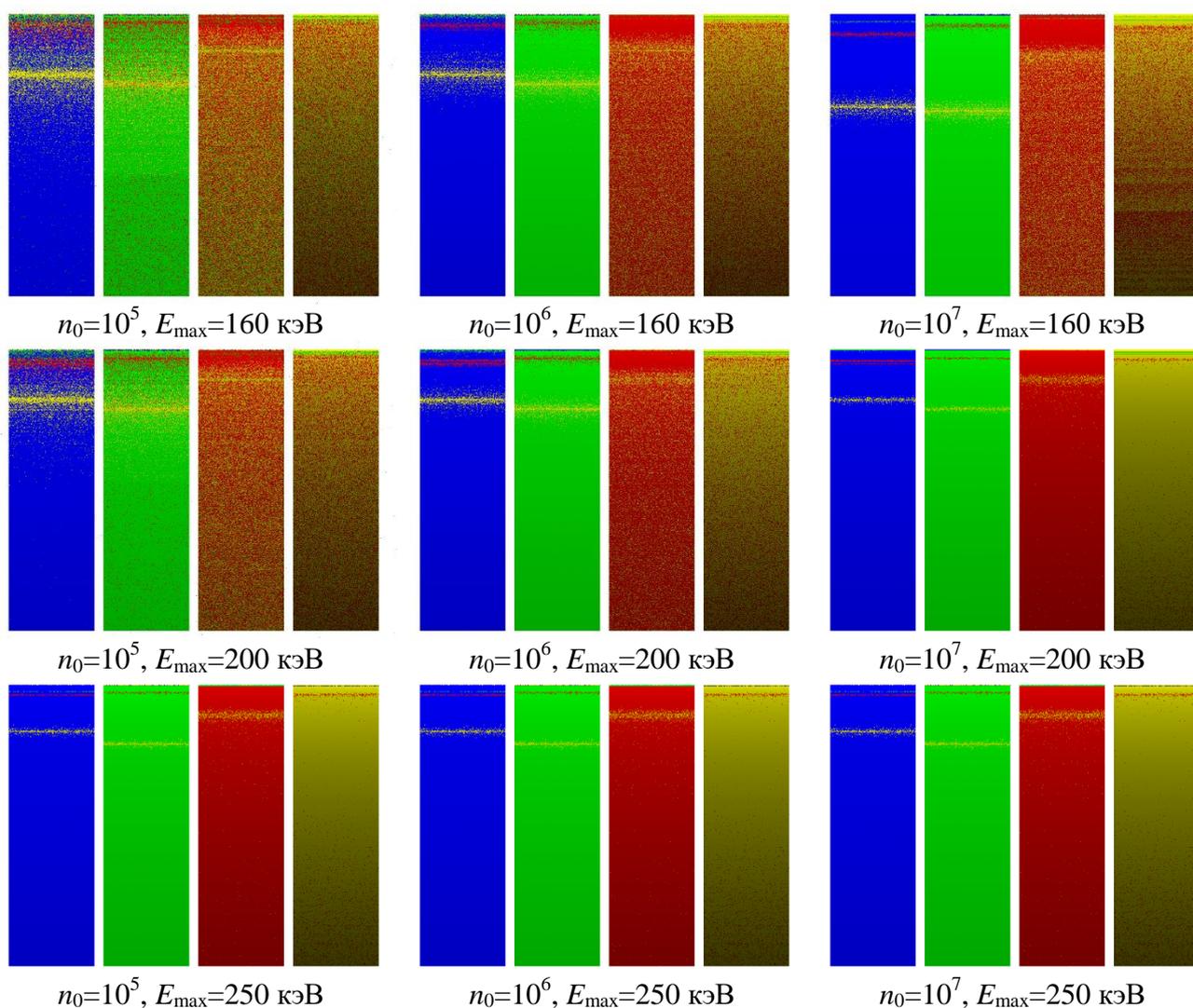


Рисунок 3 – Изображения параметра распознавания  $Q$  для  $k=16$ :

■ – углерод; ■ – алюминий; ■ – железо; ■ – цирконий

Из анализа рисунка 3 следует существенность улучшения качества распознавания с ростом максимальной энергии  $E_{\max}$  вплоть до 250 кэВ. С достаточной степенью уверенности распознаются все четыре материала, разумеется, при достаточно большом значении параметра  $n_0$ . Отметим, что для небольших уровней максимальной энергии ИРИ наблюдается некачественное распознавание циркония. Возможно, что это связано с малостью аналоговых сигналов и несогласованностью диапазонов изменения аналоговых и цифровых сигналов. Эта гипотеза нуждается в проверке.

### 4.3 Вариация разрядности АЦП

На рисунке 4 приведены изображения параметра распознавания  $Q$  для  $n_0=10^7$ . Варьировались параметры; максимальная энергия рентгеновского излучения –  $E_{\max}=160$  кэВ, 200 кэВ и 250 кэВ; разрядность аналого-цифрового преобразователя –  $k=20, 24$ .

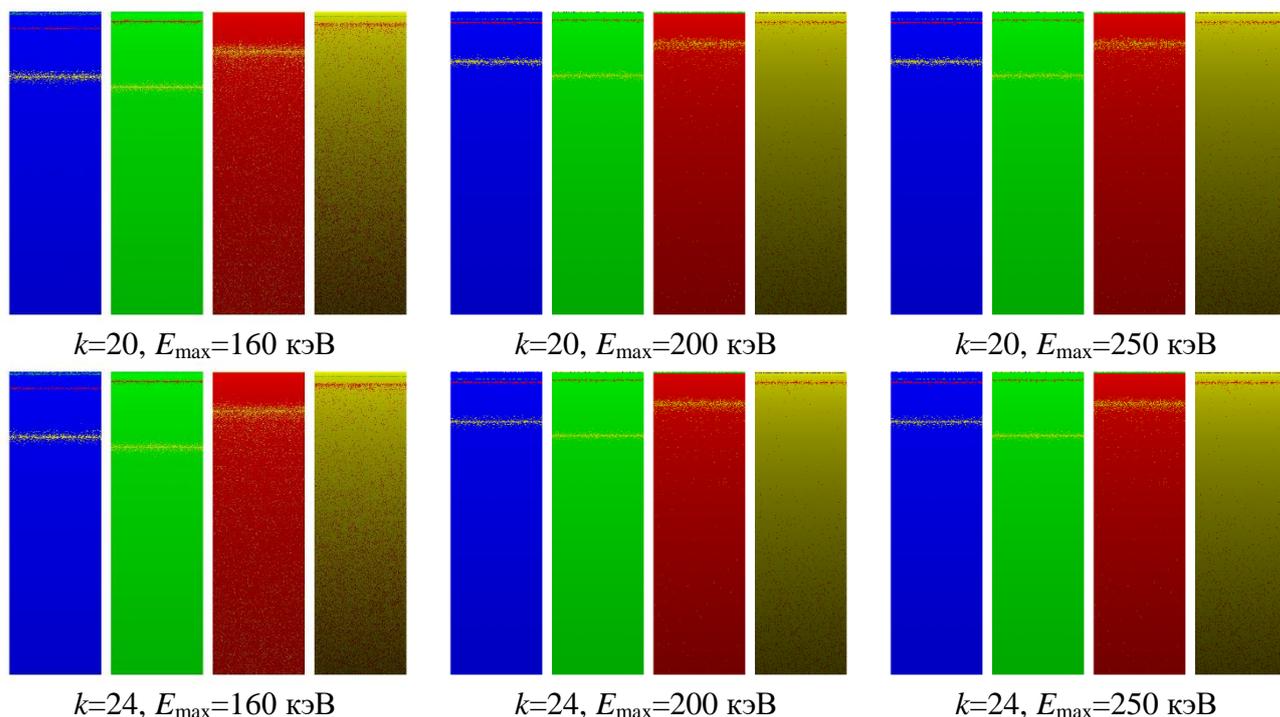


Рисунок 4 – Изображения параметра распознавания  $Q$  для  $n_0=10^7$ :

■ – углерод; ■ – алюминий; ■ – железо; ■ – цирконий

Из анализа и сравнения результатов, приведённых на рисунках 2–4 можно считать доказанной гипотезу, сформулированную выше. Для

рассматриваемого диапазона массовых толщин и исследуемых материалов достаточно применять в СДК аналого-цифровые преобразователи с разрядностью  $k=20$ .

Несмотря на существенное повышение качества распознавания анализируемых групп материалов остаются ярко выраженными интервалы некорректного распознавания материалов. Возможно, что этот негативный фактор уменьшается при одновременном увеличении «мягкости» зарегистрированного рентгеновского излучения в первом детекторе сэндвича и при увеличении «жесткости» зарегистрированного рентгеновского излучения во втором детекторе сэндвича. Естественно ожидать, что «мягкость» рентгеновского излучения определяется толщиной радиационно-чувствительного преобразователя первого детектора сэндвича, а «жесткость» – толщиной промежуточного фильтра, в большей степени, и толщиной радиационно-чувствительного преобразователя второго детектора сэндвича, в меньшей степени.

#### 4.4 Вариации параметров сэндвич-детектора

На рисунке 5 приведены изображения параметра распознавания  $Q$  для числа фотонов на лобовой поверхности радиационно-чувствительного преобразователя первого детектора сэндвича –  $n_0=10^7$ , максимальной энергии рентгеновского излучения –  $E_{\max}=200$  кэВ и разрядности АЦП –  $k=20$ . Вариации подвергались: толщина РЧП первого детектора сэндвича –  $h_L=0,1$  мм, 0,2 мм, 0,3 мм; толщина РЧП второго детектора сэндвича –  $h_H=2,5$  мм, 5 мм, 10 мм; толщина предварительного фильтра –  $h_F=2$  мм, 3 мм, 5 мм.

Оптимистический прогноз (гипотеза), предполагающий полное устранение интервалов некорректного распознавания с помощью вариации параметров системы досмотрового контроля не подтвердился. Следует констатировать, что существование интервалов некорректного распознавания является внутренним неустранимым свойством рассматриваемой реализации метода дуальных энергий.

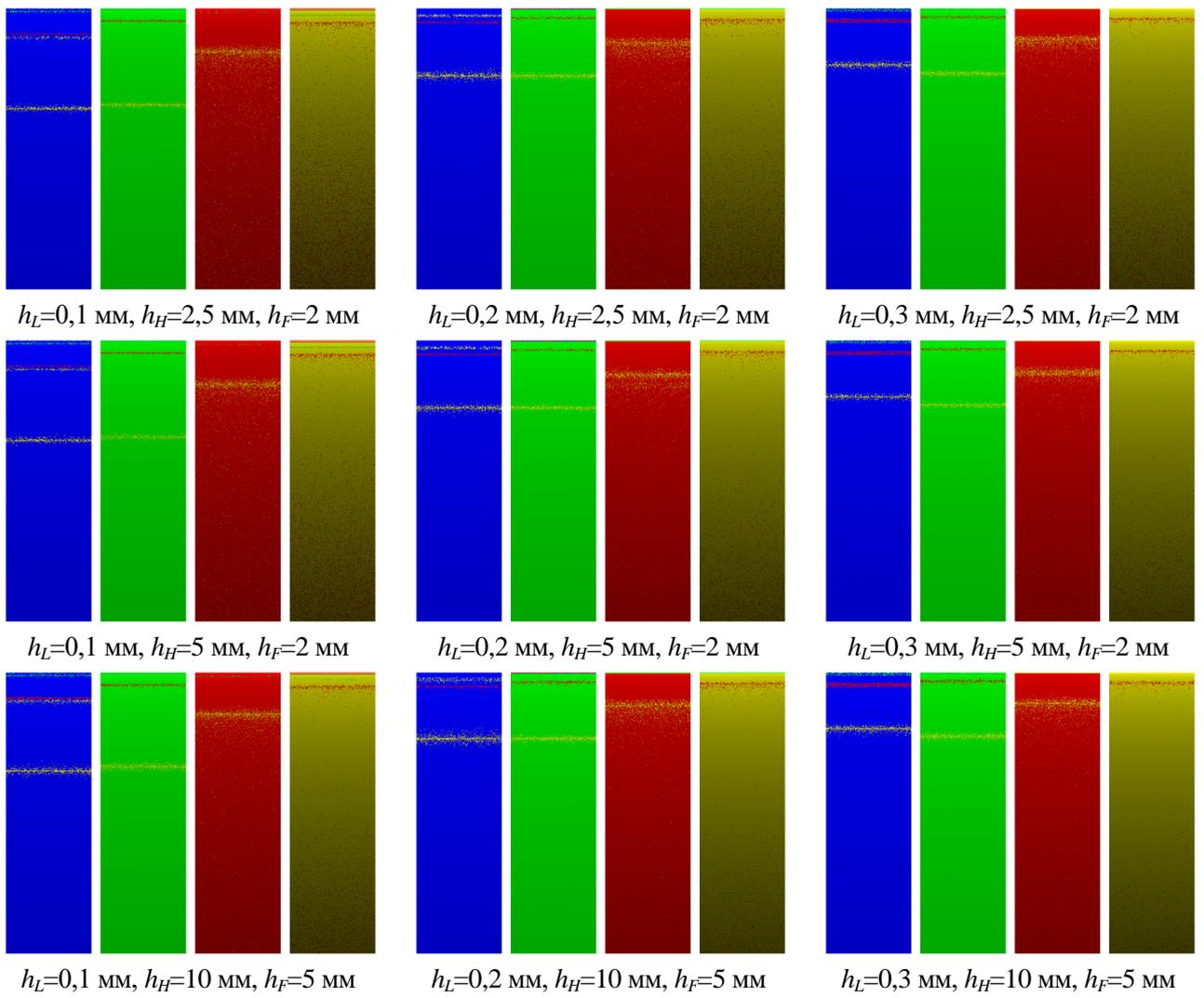


Рисунок 5 – Изображения параметра распознавания  $Q$  для  $k=20$ ,  $n_0=10^7$ ,  $E_{\max}=200$  кэВ:

■ – углерод; ■ – алюминий; ■ – железо; ■ – цирконий

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

На сегодняшний день разработка виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади, с точки зрения коммерческой ценности является достаточно целесообразным решением, т.к. проектируемые досмотровые комплексы зависят от большого количества параметров, корректный выбор и оценка которых экспериментальным путём является задачей повышенной сложности, требующей для своего решения огромных материальных и временных ресурсов.

Целью данного раздела является оценка перспективности разработки виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади, а также разработка механизма управления и сопровождения проектных решений на стадии реализации рассматриваемого проекта.

### **5.1 Предпроектный анализ. Потенциальные потребители результатов исследования**

Целевой рынок – группа сегментов рынка, для которых в будущем, в качестве товара будет предложена проектируемая разработка.

Целевым рынком выступают подразделения, осуществляющие досмотровый контроль багажа и ручной клади.

Сегментом рынка для данной разработки является досмотровой контроль багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов, в узлах транспортной инфраструктуры и стратегических объектах. Карта сегментирования рынка услуг по разработке представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Карта сегментирования рынка услуг по разработке

| Места проведения досмотрового контроля | Вид досмотрового контроля |                     |
|--|---------------------------|---------------------|
|  | Со вскрытием багажа       | Без вскрытия багажа |
| Аэропорт                               | А, В                      | А                   |
| Ж/д вокзал                             | А, В                      | А                   |
| Стратегические объекты                 | А, В                      | А                   |

Службы безопасности А – проводят досмотровый контроль с применением досмотровых комплексов багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов.

Службы безопасности В – проводят досмотровый контроль при помощи визуального осмотра багажа и ручной клади, а также при помощи специально обученных собак.

По приведенной карте сегментирования рынка услуг, можно судить о том, что ни один узел транспортной инфраструктуры и ни один объект не сможет обойтись без досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов. Отсюда следует, что абсолютно необходимо совершенствование досмотровых комплексов, для предотвращения террористических угроз и экономических преступлений.

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

Анализ конкурентных технических решений необходим для того, чтобы оценить конкурирующие разработки, присутствующие на рынке на сегодняшний день. Такой анализ позволяет предложить свои исследования и разработки в данном направлении для конкурентоспособности на рынке.

Данный анализ следует проводить с помощью оценочной карты.

Для составления оценочной карты были выбраны две модификации метода дуальных энергий:

1 – В первой модификации МДЭ объект контроля сканируется пучками рентгеновского излучения с двумя специальным образом подобранными максимальными подобранными энергиями.

2 – Во второй модификации МДЭ объект контроля (ОК) сканируется пучком рентгеновского излучения с одной максимальной энергией с регистрацией излучения сэндвич детектором.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (15)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таблица 2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

| Критерии оценки   | Вес критерия | Баллы     |           | Конкурентоспособность |             |
|---|--------------|-----------|-----------|-----------------------|-------------|
|   |              | $B_1$     | $B_2$     | $K_1$                 | $K_2$       |
| 1   | 2            | 3         | 4         | 5                     | 6           |
| <b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b> |              |           |           |                       |             |
| 1. Повышение производительности труда пользователя      | 0,2          | 5         | 5         | 1                     | 1           |
| 2. Удобство в эксплуатации                              | 0,1          | 4         | 4         | 0,4                   | 0,4         |
| 3. Возможность подключения ЭВМ к сети                   | 0,2          | 3         | 3         | 0,6                   | 0,6         |
| 4. Функциональность                                     | 0,15         | 4         | 5         | 0,6                   | 0,75        |
| 5. Безопасность   | 0,15         | 5         | 5         | 0,75                  | 0,75        |
| <b>Экономические критерии оценки эффективности</b>      |              |           |           |                       |             |
| 6. Цена   | 0,05         | 3         | 4         | 0,15                  | 0,2         |
| 7. Конкурентоспособность системы                        | 0,05         | 4         | 5         | 0,2                   | 0,25        |
| 8. Финансирование научной разработки                    | 0,1          | 2         | 2         | 0,2                   | 0,2         |
| <b>Итого</b>  | <b>1</b>     | <b>30</b> | <b>33</b> | <b>3,9</b>            | <b>4,15</b> |

Анализ конкурентных технических решений показал что, несмотря на огромное количество присутствующих на рынке досмотровых комплексов, виртуальный досмотровый комплекс багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов имеет ряд преимуществ перед конкурирующими разработками. Основным достоинством виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади является производительность труда, его функциональность и безопасность.

### 5.1.2 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – комплексный анализ научно – исследовательского проекта. SWOT анализ применяется для исследования внутренней и внешней среды проекта, проводящийся в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании слабых и сильных сторон, установление возможностей и угроз, необходимых для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Результаты первого этапа SWOT – анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица SWOT

|   | Сильные стороны научно - исследовательского проекта:  | Слабые стороны научно - исследовательского проекта:   |
|---|---|---|
|   | <p>С1. Возможность варьирования параметрами досмотрового комплекса</p> <p>С2. Экологичность разработки</p> <p>С3. Возможность долгосрочного использования программы</p> | <p>Сл1. Отсутствие финансовых средств на приобретение комплектующих досмотровой установки</p> <p>Сл2. Низкая заинтересованность потребителя (заказчика)</p> <p>Сл3. Присутствие на рынке альтернативных средств досмотрового контроля</p> |
| <p>Возможности:</p> <p>В1. Досмотровой комплекс осуществляет распознавание объектов</p> <p>В2. Возможность обнаружения веществ запрещенных к провозу или не указанных в декларации</p> <p>В3. Появление спроса на принципиально новые досмотровые установки</p> |   |   |
| <p>Угрозы:</p> <p>У1. Сложность практической реализации комплекса</p> <p>У2. Рост конкуренции среди производителей досмотровых установок</p> <p>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение со стороны потенциальных потребителей (заказчиков)</p>               |   |   |

Второй этап заключается в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно – исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Данное соответствие поможет выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Интерактивная матрица проекта представлена в таблицах 4 – 7.

Таблица 4 – Интерактивная матрица проекта (1)

| Возможности проекта | Сильные стороны проекта |    |    |
|---------------------|-------------------------|----|----|
|                     | С1                      | С2 | С3 |
| В1                  | +                       | +  | +  |
| В2                  | +                       | +  | +  |
| В3                  | +                       | +  | +  |

Таблица 5 – Интерактивная матрица проекта (2)

| Возможности проекта | Слабые стороны проекта |     |     |
|---------------------|------------------------|-----|-----|
|                     | Сл1                    | Сл2 | Сл3 |
| В1                  | +                      | +   | +   |
| В2                  | –                      | –   | +   |
| В3                  | +                      | +   | +   |

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта (3)

| Возможности проекта | Сильные стороны проекта |    |    |
|---------------------|-------------------------|----|----|
|                     | С1                      | С2 | С3 |
| У1                  | –                       | 0  | –  |
| У2                  | +                       | +  | –  |
| У3                  | +                       | +  | +  |

Таблица 7 – Интерактивная матрица проекта (4)

| Возможности проекта | Слабые стороны проекта |     |     |
|---------------------|------------------------|-----|-----|
|                     | Сл1                    | Сл2 | Сл3 |
| У1                  | +                      | 0   | –   |
| У2                  | +                      | +   | +   |
| У3                  | +                      | +   | –   |

На третьем этапе составляется итоговая матрица SWOT – анализа. Данная матрица приведена в таблице 8.

Таблица 8 – Итоговая матрица SWOT – анализа

|   | Сильные стороны научно - исследовательского проекта:  | Слабые стороны научно - исследовательского проекта:   |
|---|---|---|
|   | <p>С1. Возможность варьирования параметрами досмотрового комплекса</p> <p>С2. Экологичность разработки</p> <p>С3. Возможность долгосрочного использования программы</p> | <p>Сл1. Отсутствие финансовых средств на приобретение комплектующих досмотровой установки</p> <p>Сл2. Низкая заинтересованность потребителя (заказчика)</p> <p>Сл3. Присутствие на рынке альтернативных средств досмотрового контроля</p> |
| <p>Возможности:</p> <p>В1. Досмотровой комплекс осуществляет распознавание объектов</p> <p>В2. Возможность обнаружения веществ запрещенных к провозу или не указанных в декларации</p> <p>В3. Появление спроса на принципиально новые досмотровые установки</p> | <p>Возможность заключения контрактов с рядом ведущих Российских и иностранных производителей досмотровых установок багажа и ручной клади</p>                            | <p>Требуется повышение заинтересованности у потребителя (заказчика)</p>   |
| <p>Угрозы:</p> <p>У1. Сложность практической реализации комплекса</p> <p>У2. Рост конкуренции среди производителей досмотровых установок</p> <p>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение со стороны потенциальных потребителей (заказчиков)</p>               | <p>Повышение квалификации обслуживающего персонала</p>  | <p>Требуется огромные затраты материальных и временных ресурсов</p>   |

## 5.2 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На любой стадии жизненного цикла научной разработки полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации, а также выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (завершения). Для этого заполняется специальная таблица, содержащая в себе показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

При проведении данного анализа, по каждому показателю ставится

оценка по пятибалльной системе. При оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта.

Оценка уровня готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (16)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Таблица 9 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

| № п/п | Наименование   | Степень проработанности проекта | Уровень имеющихся знаний у разработчика |
|-------|--|---------------------------------|---|
| 1.    | Определен имеющийся научно – технический задел                                     | 4                               | 4                                       |
| 2.    | Определены перспективные направления коммерциализации научно – технического задела | 4                               | 3                                       |
| 3.    | Определены отрасли и технологии (товары и услуги) для предложения на рынке         | 4                               | 4                                       |
| 4.    | Определена товарная форма научно – технического задела для представления на рынок  | 3                               | 3                                       |
| 5.    | Определены авторы и осуществлена охрана их прав                                    | 4                               | 4                                       |
| 6.    | Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности                          | 4                               | 3                                       |
| 7.    | Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта                                  | 3                               | 3                                       |
| 8.    | Разработан бизнес – план коммерциализации научной разработки                       | 3                               | 3                                       |

Продолжение таблицы 9

|     |   |    |    |
|-----|---|----|----|
| 9.  | Определены пути продвижения научной разработки на рынок                           | 3  | 3  |
| 10. | Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки                       | 4  | 4  |
| 11. | Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок    | 3  | 3  |
| 12. | Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот | 4  | 3  |
| 13. | Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки            | 3  | 3  |
| 14. | Имеется команда для коммерциализации научной разработки                           | 4  | 3  |
| 15. | Проработан механизм реализации научного проекта                                   | 4  | 3  |
|     | Итого баллов  | 54 | 49 |

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Если значение  $B_{\text{сум}}$  получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – перспективность ниже среднего. Если же 14 и ниже – то перспективность крайне низкая. Исходя из вышеописанного, по результатам степени готовности научного проекта к коммерциализации можно сделать вывод о том, что уровень перспективности разработки выше среднего.

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

#### *5.3.1 План проекта*

Планирование научно – исследовательской работы проводится в несколько этапов:

- 1) Составление перечня работ, необходимых для достижения поставленных целей и задач;
- 2) Определение сроков выполнения работ;
- 3) Построение линейного графика проведения научно – исследовательских работ.

В разработке виртуального комплекса досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов участие принимали следующие исполнители:

- 1) Магистрант;
- 2) Научный руководитель.

Научно – исследовательская работа включает в себя три основных этапа:

- 1) Подготовительный;
- 2) Основной;
- 3) Заключительный.

В рамках планирования ВКР необходимо построить календарный план график проведения НИР. Данный график строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени, отведенный на выполнение научного проекта.





## 5.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научно – технического должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета научно – технического исследования планируемые затраты группируются по следующим статьям:

- 1) Сырье, материалы необходимые для выполнения ВКР;
- 2) Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ);
- 3) Основная заработная плата исполнителей темы;
- 4) Дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- 5) Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 6) Накладные расходы.

### 5.4.1 Сырье, материалы необходимые для выполнения ВКР

Проводим расчет затрат на покупку всех видов материалов и комплектующих необходимых для исследований с указанием количества потребного материала, цены за единицу и общей суммы.

Таблица 11 – Сырье, материалы необходимые для выполнения исследования

| Наименование                             | Кол-во | Цена за единицу, руб | Сумма, руб. |
|--|--------|----------------------|-------------|
| Бумага формата А4                        | 1 шт.  | 245                  | 245         |
| Канцелярские товары                      | 1 шт.  | 100                  | 80          |
| Картридж для принтера <i>HP LaserJet</i> | 1 шт.  | 808                  | 808         |
| Итого по статье С <sub>м</sub>           |        |                      | 1133        |

### 5.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ)

В данной статье отражаются все затраты, связанные с приобретением, изготовлением или арендой специального оборудования, необходимого для проведения экспериментальных работ. Расчет стоимости затрат производится по действующим прейскурантам. Стоимость оборудования, используемого при

выполнении научно – технического исследования и имеющегося в научно – технической организации, учитывается в виде амортизационных отчислений.

Таблица 12 – Расчет затрат на спецоборудование для научных работ

| № п/п | Наименование оборудования           | Кол–во единиц оборудования | Цена единицы оборудования, тыс. руб. | Общая стоимость оборудования, тыс. руб. |
|-------|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---|
| 1.    | Персональный компьютер              | 1                          | 98000                                | 98000                                   |
| 2.    | Программное обеспечение РТС Mathcad | 1                          | 21000                                | 21000                                   |
| 3.    | Итого                               | 2                          |                                      | 119000                                  |

Затраты на спецоборудование для научных работ составили 119000 рублей, со сроком пользования 5 лет.

В налоговом учете применяются два метода начисления амортизации: линейный и нелинейный метод. Налогоплательщик может применять любой из указанных методов.

При применении линейного метода норма амортизации определяется по формуле:

$$K = \left( \frac{1}{n} \right) \cdot 100\% \quad (17)$$

где  $K$  – норма амортизации к первоначальной стоимости объекта;

$n$  – срок полезного использования амортизируемого имущества.

Годовая норма амортизационных отчислений – 20 %. Годовая сумма амортизационных отчислений рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{ПС \cdot K}{100\%} \quad (18)$$

где  $A$  – годовая сумма амортизационных отчислений;

$ПС$  – сумма затрат на спецоборудование для научных работ;

$K$  – норма амортизации к первоначальной стоимости объекта;

$$A = \frac{119000 \cdot 20\%}{100\%} = 23800$$

Годовая сумма амортизационных отчислений составляет 23800 рублей.

#### 5.4.3 Расчет основной заработной платы исполнителей темы

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно – технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств. В состав основной заработной платы входит премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада.

Основная заработная плата работников, непосредственно занятых выполнением научно – технического исследования, (включая премии, доплаты) и дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (19)$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Оклад руководителя (кандидата технических наук) составляет 26300 рублей.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} \quad (20)$$

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

$T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно – техническим работником, раб. дн. (таблица 13);

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{м} \cdot M}{F_{д}} \quad (21)$$

где  $Z_{м}$  – 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. (таблица 13).

Таблица 13 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени                                  | Руководитель | Студент |
|--|--------------|---------|
| Календарное число дней                                       | 365          | 365     |
| Количество нерабочих дней<br>- выходные<br>- праздничные     | 118          | 118     |
| Потери рабочего времени<br>- отпуск<br>- невыходы по болезни | 42           | 42      |
| Действительный фонд рабочего времени                         | 204          | 204     |

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + \kappa_{пр} + \kappa_d) \cdot \kappa_p \quad (22)$$

где  $Z_{tc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$\kappa_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 процентов от  $Z_{tc}$ );

$\kappa_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет приблизительно 0,2 – 0,5;

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

Таблица 14 – Расчет основной заработной платы

| Исполнители     | $Z_{tc}$ ,<br>тыс.<br>руб. | $\kappa_{пр}$ | $\kappa_d$ | $\kappa_p$ | $Z_m$ ,<br>тыс.<br>руб. | $Z_{дн}$ ,<br>тыс.<br>руб. | $T_p$ ,<br>раб.<br>дн. | $Z_{осн}$ ,<br>тыс.<br>руб. |
|-----------------|----------------------------|---------------|------------|------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Руководитель    | 26,3                       | 0,3           | 0,3        | 1,3        | 20,51                   | 1,315                      | 50                     | 65,75                       |
| Студент         | 6,0                        | 0             | 0          | 1,3        | 7,8                     | 0,26                       | 81                     | 21,06                       |
| Итого $Z_{осн}$ |                            |               |            |            |                         |                            |                        | 86,81                       |

#### 5.4.4 Расчет дополнительной заработной платы исполнителей темы

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15 % от основной заработной платы, работников, непосредственно принимающих участие в выполнении научно – технического исследования.

Дополнительная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = \kappa_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (23)$$

где  $\kappa_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы,  $\kappa_{\text{доп}}=0.15$ .

Таблица 15 – Дополнительная заработная плата исполнителей

| Заработная плата                | Руководитель | Студент |
|---------------------------------|--------------|---------|
| Основная зарплата               | 65.75        | 21.06   |
| Дополнительная зарплата         | 9.86         | 3.15    |
| Итого по статье $C_{\text{зп}}$ |              | 13.01   |

#### 5.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Данная статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды. Величина отчислений во внебюджетные фонды рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{\text{внеб}} = \kappa_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (24)$$

где  $\kappa_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На основании пункта 1 статьи 58 № 212 – ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2019 году вводится пониженная ставка отчислений – 28 %.

Таблица 16 – Отчисления во внебюджетные фонды

| Исполнитель  | Заработная плата, тыс. руб. |
|--------------|-----------------------------|
| Руководитель | 21,17                       |
| Студент      | 6,77                        |
| Итого        | 27,94                       |

### 5.5 Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур:

- 1) Проектная;
- 2) Функциональная;
- 3) Матричная.

После анализа перечня этапов и работ научно – исследовательского проекта было определено, что наиболее подходящей структурой для данного

проекта является проектная структура. Данная структура представлена на рисунке 6.



Рисунок 6 – Проектная структура проекта

## 5.6 Формирование бюджета затрат научно – технического исследования

Расчитанная величина затрат научно – исследовательской работы (ВКР) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно – технической продукции.

В процедуре формирования бюджета затрат научно – технического исследования, планируемы затраты формируются по статьям и сводятся в таблицу 17.

Таблица 17 – Расчет бюджета затрат научно – технического исследования

| № п/п | Наименование статьи      | Сумма, тыс. руб. | Примечание  |
|-------|--------------------------|------------------|-------------|
| 1.    | Материальные затраты НТИ | 1,13             | Пункт 5.4.1 |

Продолжение таблицы 17

|    |   |        |                       |
|----|---|--------|-----------------------|
| 2. | Затраты на спецоборудование для научных работ | 119,00 | Пункт 5.4.2           |
| 3. | Затраты по основной заработной плате          | 86,81  | Пункт 5.4.3           |
| 4. | Затраты по дополнительной заработной плате    | 13,01  | Пункт 5.4.4           |
| 5. | Отчисления во внебюджетные фонды              | 27,05  | Пункт 5.4.5           |
| 6. | Бюджет затрат НИИ                             | 247,00 | Сумма ст. 5.4.1-5.4.5 |

## **6 Социальная ответственность**

Целью настоящей работы является разработка виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов.

На сегодняшний день особую популярность получили рентгенотелевизионные установки, которые имеют свои недостатки и преимущества. К преимуществам можно отнести высокую скорость досмотра багажа и ручной клади, обнаружение взрывчатых веществ и устройств, холодного и огнестрельного оружия. К недостаткам относится недостаточно высокий уровень вероятности отличия взрывчатых веществ от безопасных материалов с близкой им плотностью. Алгоритмы обработки изображений присутствующие в досмотровых комплексах позволяют выделять границы изображений подозрительных фрагментов в багаже и ручной клади, но принятие конечного решения остается за оператором. Очевидно, что повышение вероятности обнаружения запрещенных предметов и корректного распознавания их материалов, а также снижения уровня вероятности ложных заключений о наличии запрещённых вложений остаются актуальными задачами.

В данном разделе будут рассмотрены вопросы, связанные с производственной безопасностью, с правовыми и организационными вопросами обеспечения безопасности, с охраной окружающей среды и безопасностью в чрезвычайных ситуациях.

### **6.1 Анализ вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды**

В данном подразделе рассматриваются и анализируются вредные и опасные факторы [45], возникающие при проведении научных исследований в лаборатории, при разработке виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади.

### *6.1.1 Опасные производственные факторы*

#### *Электрический ток в электроустановках*

Опасность поражения электрическим током присутствует всегда, если есть контакт с устройством, питаемым напряжением 36 В и выше, а тем более от электрической сети напряжением 220 В. Это может произойти из-за случайного прикосновения к открытым токоведущим частям, а также из-за других различных причин (некачественная изоляция проводов, перегрузки электросети, механические повреждения).

Для сведения к минимуму потенциальной опасности электротравматизма необходимо соблюдать требования установленные «Правилами техники безопасности при эксплуатации потребителей» и «Правилами эксплуатации электроустановок потребителей» (ПЭ и ПТБ электроустановок потребителей). Для исключения поражения током при работе с ПК также следует установить дополнительные оградительные устройства, обеспечивающие недоступность токоведущих частей для прикосновения, с этой целью обязательным является следующие средства и способы защиты:

- 1) Защитное заземление, зануление (защитное отключение);
- 2) Вывешивание предупреждающих плакатов (надписей);
- 3) Контроль над состоянием изоляции электрических установок напряжением до 1000 В.

Для безопасной и качественной работы компьютеров специально создается отдельный заземляющий контур [46].

### *6.2.2 Вредные производственные факторы*

#### *1) Электромагнитное излучение от ПК*

В быту встречается множество источников излучения электромагнитных полей, к ним относятся: телевизор, микроволновая печь, ПК. Компьютер является самым опасным из них потому, что человек проводит длительное время в непосредственной близости от него.

Пользователь ПК подвержен сразу двум источникам электромагнитного излучения:

- 1) Монитор;
- 2) Системный блок.

Также кроме этого существуют и вторичные факторы, которые усугубляют положение пользователя ПК, к ним относят работу в тесном непроветриваемом помещении и скоплению множества ПК в одном месте.

Судя по последним исследованиям, стало известно, что человеческий организм наиболее подвержен к электромагнитному излучению, находящемуся на частотах 40 – 70 ГГц, так как длины волн на этих частотах соизмеримы с размерами клеток и достаточно незначительного уровня электромагнитного поля, чтоб нанести существенный урон здоровью человека. Отличительной же особенностью современных компьютеров является увеличение рабочих частот центрального процессора и периферийных устройств, а также повышение потребляемой мощности до 400 – 500Вт. В результате этого уровень излучения системного блока на частотах 40 – 70 ГГц за последнее время увеличился в несколько тысяч раз и стал намного более серьезной проблемой, чем излучение от монитора.

Электромагнитное излучение наибольшее влияние оказывает на нервную, иммунную, эндокринную и половую систему. Признаками расстройства являются быстрая утомляемость, ослабление памяти, раздражительность, общая напряженность.

К основным средствам защиты от электромагнитного поля промышленной частоты относятся:

- 1) Стационарные и переносные заземленные экранирующие устройства (козырьки, навесы, щиты или перегородки из металлических канатов, прутков, сеток);
- 2) Средства индивидуальной защиты (защитный костюм, комбинезон, экранирующий головной убор, специальная обувь).

Для работников предусмотрены предварительные и периодические медицинские осмотры [47].

### *2) Освещенность рабочей зоны пользователя*

Одним из важных параметров климатических условий рабочего места является освещенность, которая влияет не только на производительность труда, но и напрямую связана с физическим состоянием человека. Установлено, что при длительной работе в условиях недостаточной освещенности и при нарушении других параметров световой среды зрительное восприятие снижается, развивается близорукость, болезнь глаз, появляются головные боли.

При проведении научных исследований в помещении должны применяться системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения [48].

Согласно [48], минимальная искусственная освещенность рабочего места за ПК составляет 300 лк.

Среди основных показателей световой среды очень важным является коэффициент пульсации освещенности (Кп). Коэффициент пульсации освещенности – это критерий оценки глубины колебаний (изменений) освещенности, создаваемой осветительной установкой, во времени. Требования к коэффициенту пульсации освещенности наиболее жесткие для рабочих мест с ПЭВМ — не более 5% [49].

### *3) Параметры микроклимата*

Микроклимат производственных помещений – климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями таких параметров как: температура, влажность, скорость движения воздуха, интенсивностью теплового излучения от нагретых поверхностей.

Указанные параметры – каждый в отдельности и в совокупности оказывают огромное влияние на работоспособность человека, его самочувствие и здоровье. Неблагоприятные значения микроклиматических показателей могут

стать причиной снижения производственных показателей в работе, а также привести к различным заболеваниям.

С целью создания благоприятных условий микроклимата на рабочих местах установлены нормы производственного микроклимата [50].

Разработка виртуального комплекса досмотрового контроля багажа и ручной клади осуществляется при помощи ПК, и относится к легкой категории работ Ia.

Рекомендуемые параметры микроклимата приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах

| Период года | Температура воздуха, °С | Температура поверхностей, °С | Относительная влажность, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Холодный    | 22–24                   | 21–25                        | 40–60                      | 0.1                            |
| Теплый      | 23–25                   | 22–26                        | 40–60                      | 0.1                            |

Для обеспечения благоприятных условий труда пользователя ПК и повышения его производительности, необходимо поддерживать оптимальные величины параметров микроклимата производственных помещений. Для этого существуют следующие средства поддержания этих величин:

- 1) Центральное отопление;
- 2) Системы кондиционирования;
- 3) Механическая вентиляция.

#### *4) Шум и вибрация в помещении*

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, установленных [51] и составляют не более 50 дБА. На рабочих местах в помещениях для размещения шумных агрегатов уровень шума не должен превышать 75 дБА, а уровень вибрации в помещениях допустимых значений по [52] категория 3, тип «в».

Снизить уровень шума в помещениях можно использованием звукопоглощающих материалов с максимальными коэффициентами звукопоглощения в области частот 63-8000 Гц для отделки стен и потолка помещений. Дополнительный звукопоглощающий эффект создают однотонные занавески из плотной ткани, повешенные в складку на расстоянии 15-20 см от ограждения. Ширина занавески должна быть в 2 раза больше ширины окна.

## **6.2 Охрана окружающей среды**

Разработка виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади не представляет особой экологической угрозы для общества, т.к. она осуществляется на ПК, но необходимо знать, что после выработки компьютера его стоит утилизировать в соответствии с [53].

ПК состоит из различных деталей, которые могут негативно сказаться на экологии территории, поэтому обычное выбрасывание его на свалку может привести к серьезным последствиям. Запчасти, в которых содержится свинец, ртуть, олово, отравляют почву и атмосферу, что приводит к гибели живых организмов. Незаконный выброс компьютерной техники влечет за собой административные штрафы как физических, так и юридических лиц.

Компьютерную технику утилизируют посредством термической обработки (циклонные сепараторы, металлоплавильные и специальные микроволновые печи) и с помощью определенного оборудования. Существуют станки для извлечения электронных элементов компьютерной техники, к примеру, плат. После автоматического изъятия компонентов проходит ручная сортировка. Затем детали отправляются в шредер или размольную мельницу, которые их перемалывают.

Этапы по утилизации компьютерной техники:

- 1) Создать внутреннюю комиссию в организации для принятия решения о списании техники;
- 2) Составляется экспертное заключение о невозможности дальнейшего пользования ПК;

3) Осуществить списание компьютерной техники, которое будет отражено в бухгалтерском учете;

4) Утилизировать ПК на лицензированном предприятии и получить официальную бумагу об утилизации (акт о проведенных действиях, приема – передачи).

### **6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Персональный компьютер на сегодняшний день используется практически во всех лабораториях и организациях. Использование компьютера влечет за собой как негативное влияние на здоровье пользователя, так и может привести к несчастным случаям (поражению электрическим током) и чрезвычайным ситуациям (возникновение возгорания). Для того чтобы избежать этого пользователи должны строго соблюдать технику безопасности при работе за ПК.

Требования охраны труда в чрезвычайных ситуациях [54]:

1) При наличии неисправности ПК необходимо отключить его от электропитания. Запрещаются попытки самостоятельного устранения причины неисправности, об этом нужно сообщить с соответствующие службы технического обслуживания;

2) В случае возгорания ПК или электропровода следует немедленно отключить его от сети, включить пожарную тревогу, сообщить о возгорании в пожарную часть по телефону 01 (010 с мобильного телефона), приступить к тушению пожара порошковым огнетушителем. Запрещается применять пенные огнетушители для тушения электрооборудования под напряжением, т.к. пена имеет хорошие свойства электропроводимости;

3) В случае поражения человека электрическим током необходимо освободить его от действия электрического тока (выключив рубильник или перерезав провода), затем попытаться оказать первую медицинскую помощь пострадавшему и обратиться в скорую помощь по телефону 03 (030 с мобильного).

Средства тушения возгорания:

- Переносные: Огнетушитель порошковый ОП-4, ОП-5, ОП-6, ОП-8;
- Передвижные: Огнетушитель порошковый ОП-25, ОП-35, ОП-40, ОП-50, ОП-70.

Порошковый огнетушитель наиболее универсален по области применения и по рабочему диапазону температур (особенно с зарядом типа А,В,С,Е), им можно успешно тушить почти все классы пожаров, в том числе и электрооборудование, находящееся под напряжением до 1000 В.

Для исключения всевозможных рисков возникновения ЧС, необходимо ответственно относиться ко всем этапам использования ПК. Пользователь ПК может и должен контролировать весь цикл взаимодействия с компьютерной техникой. Элементарный процесс соблюдения всех этих несложных правил должен быть непрерывным и комплексным.

Также в помещении обязательно должен быть размещен план эвакуации при пожаре (Приложение Б).

#### **6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и социальной защиты работников на предприятии**

Данная научно – исследовательская работа связана с разработкой виртуального досмотрового комплекса багажа и ручной клади, что имеет в виду под собой разработку математической модели, алгоритма и реализующей этот алгоритм программы на персональном компьютере.

Площадь на одно рабочее место с компьютером для взрослых пользователей должна составлять не менее  $6 \text{ м}^2$ , а объем не менее –  $20 \text{ м}^3$ .

Продолжительность непрерывной работы без регламентированного перерыва не должна превышать одного часа [49]. Необходимо делать перерывы в работе за компьютером продолжительностью 10 минут через каждые 45 минут работы. Максимальное время работы в день за ПК составляет не более 6 часов. Расстояние от экрана монитора до глаз пользователя должно быть около 600 – 700 мм, но не менее 500 мм, учитывая размеры алфавитно-цифровых

знаков и символов. Экран монитора должен находиться на 20 градусов ниже глаз. Клавиатуру рекомендуется располагать на жесткой поверхности на расстоянии 100-300 мм от края стола. Расстояние от экрана монитора до задней стенки монитора соседнего ряда должно быть не менее 2000 мм, а расстояние между боковыми стенками не менее 1200 мм.

В офисах должна проводиться ежедневная влажная уборка, а также в помещении следует увеличить его влажность: на окнах разместить цветы. Оптимальная влажность для данного помещения составляет 60 %, при температуре в 22 °С [50].

В качестве источников общего освещения следует применять ртутные люминесцентные лампы типа ЛБ. Общая освещенность должна быть не менее 300 – 500 люкс. Естественный свет из окон должен падать сбоку при этом, не создавая бликов на экране монитора пользователя. В помещениях, где компьютеры расположены в два ряда, необходимо устанавливать защитный промежуточный экран для устранения избыточного облучения.

## **6.5 Социальная защита пострадавших на производстве**

Под социальной защитой работников в процессе труда понимается система экономических, социальных, правовых, организационных, медицинских и технических мер по защите работников от социальных и профессиональных рисков в процессе труда и в случае утраты трудоспособности на производстве, а также по обеспечению гарантированного обществом уровня и условий безопасности и гигиены труда, качества трудовой жизни на основе обеспечения законодательно установленных социальных гарантий жизнедеятельности человека.

### *6.5.1 Порядок возмещения вреда, причиненного жизни и здоровью граждан*

Поскольку возмещение вреда, причиненного жизни или здоровью гражданина, производится в денежной форме, то важным является содержание статьи [55]:

1) При причинении гражданину увечья или ином повреждении его здоровья возмещению подлежит утраченный потерпевшим заработок (доход), который он имел либо определенно мог иметь, а также дополнительно понесенные расходы, вызванные повреждением здоровья, в том числе расходы на лечение, дополнительное питание, приобретение лекарств, протезирование, посторонний уход, санаторно-курортное лечение, приобретение специальных транспортных средств, подготовку к другой профессии, если установлено, что потерпевший нуждается в этих видах помощи и ухода и не имеет права на их бесплатное получение;

2) Объем и размер возмещения вреда, причитающегося потерпевшему в соответствии с настоящей статьей, могут быть увеличены законом.

#### *6.5.2 Общие основания ответственности за причинение вреда*

Статья [56] гласит:

1) Вред, причиненный личности или имуществу гражданина, а также вред, причиненный имуществу юридического лица, подлежит возмещению в полном объеме лицом, причинившим вред.

Законом обязанность возмещения вреда может быть возложена на лицо, не являющееся причинителем вреда.

Законом или договором может быть установлена обязанность причинителя вреда выплатить потерпевшим компенсацию сверх возмещения вреда;

2) Лицо, причинившее вред, освобождается от возмещения вреда, если докажет, что вред причинен не по его вине. Законом может быть предусмотрено возмещение вреда и при отсутствии вины причинителя вреда;

3) Вред, причиненный правомерными действиями, подлежит возмещению в случаях, предусмотренных законом.

#### *6.5.3 Возмещение причиненного вреда*

Основания и размер компенсации гражданину морального вреда определяются правилами, предусмотренными [57]. При этом компенсация

морального вреда осуществляется независимо от подлежащего возмещению имущественного вреда.

Когда вред причинен жизни или здоровью гражданина источником повышенной опасности, компенсация морального вреда осуществляется независимо от вины причинителя вреда.

Статья [58] определяет:

1) Компенсация морального вреда осуществляется в денежной форме;

2) Размер компенсации морального вреда определяется судом в зависимости от характера причиненных потерпевшему физических и нравственных страданий, а также степени вины причинителя вреда в случаях, когда вина является основанием возмещения вреда. При определении размера компенсации вреда должны учитываться требования разумности и справедливости.

Характер физических и нравственных страданий оценивается судом с учетом фактических обстоятельств, при которых был причинен моральный вред, и индивидуальных особенностей потерпевшего.

## **Заключение**

В выпускной квалификационной работе предложена математическая модель системы досмотрового контроля с функцией распознавания материалов объектов и их структурных фрагментов методом дуальных энергий. На основе математической модели разработан соответствующий алгоритм численного моделирования, реализованный в программу в системе для математических вычислений MathCad, являющуюся виртуальным симулятором. Виртуальный симулятор позволяет проводить численные эксперименты с вариаций параметров источника рентгеновского излучения, многоканального сэндвич-детектора, геометрической схемы контроля. Использование программного симулятора на практике позволит научно обосновать возможность проектирования систем досмотрового контроля багажа и ручной клади, исходя из технических заданий, сформулированных заказчиками. С помощью программы-симулятора досмотровых систем были проведён ряд вычислительных экспериментов, результаты которых подтверждают обоснованность гипотез, упомянутых в работе.

В главе 5 «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были выполнены следующие основные задачи:

- 1) Определен план и организационная структура проекта;
- 2) Проведен SWOT – анализ, результат которого показал, что настоящая разработка имеет конкурентное преимущество перед другими технологиями в области досмотрового контроля багажа и ручной клади;
- 3) Определен бюджет научно – технического исследования, для реализации данного проекта понадобится 247000 рублей.

В главе 6 «Социальная ответственность» проведен анализ вредных и опасных производственных факторов, изучены вопросы, связанные с экологической безопасностью, проанализированы правовые и организационные мероприятия безопасности, описаны меры безопасности в чрезвычайных ситуациях, рассмотрены вопросы социальной защиты пострадавших.

## Список публикаций студента

1) Конюшков К.А., Осипов С.П., Щетинкин С.А. Моделирование систем досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов / [Электронный ресурс] / Simulation of inspection systems of baggage and hand luggage with the recognition of materials / Измерение, контроль, информатизация: материалы XIX Международной научно-технической конференции, Барнаул, 23 Мая 2018 в 2 т. / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – 2018. – Т. 1. – [С. 112-116].

2) Конюшков К.А., Осипов С.П., Щетинкин С.А. Моделирование систем досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов //Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов VII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 8–13 октября 2018 г., г. Томск. – Томск, 2018. – 2018. – С. 40.

3) Конюшков К.А., Осипов С.П., Щетинкин С.А. Виртуальный комплекс досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов / [Электронный ресурс] / Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения "Intermatic – 2018": материалы Международной научно–технической конференции, 19–23 Ноября 2018, Москва в 5 ч. / Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА). – 2018. – Ч. 4: Информационные технологии и телекоммуникации. – [С. 854-860].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Duvillier J. Inline multi-material identification via dual energy radiographic measurements / J. Duvillier et al. // NDT & E International. – 2018. – Vol. 94. – P. 120–125.
2. Karoly S. Technologies to counter aviation security threats / S. Karoly // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2017. – Vol. 1898. – no. 1. – no. article 050002.
3. Осипов С.П., Удод В.А., Ван Я. Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – с. 33–56.
4. Клименов В.А. Идентификация вещества объекта контроля методом дуальных энергий / В.А.Клименов и др. // Дефектоскопия. – 2013. – № 11. – С. 40–50.
5. Bonnin A. Concept of effective atomic number and effective mass density in dual-energy X-ray computed tomography / A. Bonnin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2014. – Vol. 318. – P. 223–231.
6. Rebuffel V. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits / V. Rebuffel et al. // Insight-non-destructive testing and condition monitoring. – 2007. – Vol. 49. – no. 10. – P. 589–594.
7. Brooks R.A. Split-detector computed tomography: A preliminary report / R.A. Brooks et al. // Radiology. – 1978. – Vol. 126. – P. 255–257.
8. Barnes G.T. Detector for dual-energy digital radiography / G.T. Barnes et al. // Radiology. – 1985. – Vol. 156. – no. 2. – P. 537–540..
9. Fredenberg E. Spectral and dual-energy X-ray imaging for medical applications / E. Fredenberg // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – Vol. 878. – P. 74–87.

10. Rogers T.W., Jaccard N., Morton E.J., Griffin L.D. Automated X-ray image analysis for cargo security: Critical review and future promise // *Journal of X-ray science and technology*. – 2017. – Vol. 25. – no. 1. – P. 33–56.
11. Rogersa T.W., Jaccarda N., Griffina L.D. A deep learning framework for the automated inspection of complex dual-energy x-ray cargo imagery // *SPIE Defense+ Security*. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – no. article 101870L – 12 p.
12. Chen Z.Q., Zhao T., Li L. A curve-based material recognition method in MeV dual-energy X-ray imaging system // *Nuclear Science and Techniques*. – 2016. – Vol. 27. – no. 1. – P. 25–31.
13. Osipov, S.P., Chakhlov, S.V., Osipov, O.S., Shtein, A.M., Strugovtsev, D.V. About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Voll. 81. – no. article 012082. – 13 p.
14. Singh S., Singh M. Explosives detection systems (EDS) for aviation security // *Signal Processing*. – 2003. – Vol. 83. – no. 1. – P. 31–55.
15. Runkle R.C., White T.A., Miller E.A., Caggiano J.A., Collins B.A. Photon and neutron interrogation techniques for chemical explosives detection in air cargo: A critical review // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2009. – Vol. 603. – no. 3. – P. 510–528.
16. Jin F. Machine vision technology for food quality and safety inspections. – University of Maryland, College Park, 2008. – 138 p.
17. Klimenov V.A., Osipov S.P., Temnik A.K. Identification of the substance of a test object using the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2013. – Vol. 49. – no. 11. – P. 642–649.
18. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Li S., Sun X., Zheng J., Hu X., Zhang G. Physi-cal and Technical Restrictions of Materials Recognition by the Dual High Energy X-ray Imaging. // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017, v. 12, № 23, p. 13127-13136.

19. X-Ray Mass Attenuation Coefficients [Электронный ресурс] URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html> (Дата обращения 02.05.2019).

20. Осипов С.П. Критерии адекватности моделей досмотровых комплексов с функцией идентификации веществ объектов контроля //Информационные технологии неразрушающего контроля: сборник научных трудов Российской школы конференции с международным участием, Томск, 27-30 октября 2015 г. – Томск, 2015. – 2015. – С. 59-67.

21. Конюшков К. А., Осипов С. П., Щетинкин С. А. Моделирование систем досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов //Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов VII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 8-13 октября 2018 г., г. Томск. – Томск, 2018. – 2018. – С. 40.

22. Клименов В.А., Осипов С.П., Темник А.К. Идентификация вещества объекта контроля методом дуальных энергий // Дефектоскопия. – 2013. – № 11. – с. 40–50.

23. Sidulenko O. A. et al. Study the possibility of using small size betatron for the identification of control objects substances by using dual energy //Kontr., Diagnost. – 2008. – №. 8. – С. 46-52.

24. Конюшков К.А., Осипов С.П., Щетинкин С.А. Виртуальный комплекс досмотрового контроля багажа и ручной клади с функцией распознавания материалов / [Электронный ресурс] / Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения "Intermatic – 2018": материалы Международной научно–технической конференции, 19–23 Ноября 2018, Москва в 5 ч. / Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА). – 2018. – Ч. 4: Информационные технологии и телекоммуникации. – [С. 854-860].

25. Абашкин А.Д., Осипов С.П., Осипов О.С. Оценка возможности измерения плотности материалов высокоэнергетическим методом дуальных

энергий //Неразрушающий контроль: сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции" Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность", Томск, 23-27 мая 2016 г. Т. 1. – Томск, 2016. – Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 5.

26. Мартышенко С.Н., Мартышенко Н.С., Кустов Д.А. Моделирование многомерных данных и компьютерный эксперимент. // Техника и технология. – 2007, № 2, с. 47–52.

27. Mery D., Mondragon G., Riffo V., Zuccar I. Detection of regular objects in baggage using multiple X-ray views // Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. – 2013. – V. 55. – No. 1. – p. 16–20.

28. Stevenson J., Gozani T., Elsalim M., Condron C., Brown C. Linac based photofission inspection system employing novel detection concepts // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2011. – Vol. 652. – no. 1. – P. 124–128.

29. Xu W., Hongyan Y., Ying Y., Wuchen W. A low noise multi-channel readout IC for X-ray cargo inspection // Journal of Semiconductors. – 2013. – Vol. 34. – no. 4. – P. 045011-1–045011-6.

30. Lechner, T., Sandin, Y., Kliger, R. Assessment of density in timber using X-ray equipment // International Journal of Architectural Heritage – 2013. – Vol. 7 – No. 4 – PP. 416–433. doi: 10.1080/15583058.2011.642055.

31. Bateni, A., Ahmadi, M., Parvin, N. Prediction of density in porous materials by x-ray techniques // Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing. – 40 China : October 25–28. Shanghai, 2008 – PP. 25–28. URL: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/53.pdf> (Дата обращения: 02.05.2019).

32. Bateni, A., Parvin, N., Ahmadi, M. Density evaluation of powder metallurgy compacts using in situ X-ray radiography // Powder Metallurgy – 2011. – Vol. 54 – No. 4 – PP. 533– 536 doi: 10.1179/003258910X12785770528217.

33. Heindel, T.J. A review of X-ray flow visualization with applications to multiphase flows // *Journal of Fluids Engineering*. – 2011. – Vol. 133 – No. 7 – 074001 (pp. 1–16) doi:10.1115/1.4004367.
34. Kastengren, A., Powell, C.F. Synchrotron X-ray techniques for fluid dynamics // *Experiments in fluids*. – 2014. – Vol. 55 – No. 3 – PP. 1–15 doi: 10.1007/s00348-014-1686-8.
35. Udod V., Van J., Osipov S., Chakhlov S., Temnik, A. State of the art and development trends of the digital radiography systems for cargo inspection // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2016. – V. 671. – No. 1. – No. article 012059.
36. Harrison R.M. Digital radiography – a review detector design // *Nucl. Instrum. and Meth.* – 1991. – V. A310. – P. 24–31.
37. Lehmann L.A., Alvarez R.E. Energy-selective radiography a review // *Digital Radiography*. – Springer, Boston, MA, 1986. – p. 145–188.
38. Kramers H. A. XCIII. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum // *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. – 1923. – V. 46. – No. 275. – P. 836–871.
39. Schiff L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // *Physical review*. – 1951. – V. 83. – P. 252–253.
40. Ali E.S.M., Rogers D.W.O. Functional forms for photon spectra of clinical linacs // *Physics in Medicine and Biology*. – 2011. – V. 57. – P. 31–50.
41. Барышева В.К., Галанов Ю.И., Ивлев Б.Т., Пахомова Е.Г. Теория вероятностей: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 136 с.
42. Udod V.A. et al. State-of-the art and development prospects of digital radiography systems for nondestructive testing, evaluation, and inspection of objects: a review // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2016. – V. 52. – №. 9. – P. 492–503.
43. Osipov S.P. et al. Physical and technical restrictions of materials recognition by the dual high energy X-ray imaging // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – V. 12. – №. 23. – P. 13127-13136.

44. Analog Devices [Электронный ресурс] URL: [https:// www. analog. com/ru/about-adi/news-room/press-releases/2012/10-12-2012\\_ad7176\\_ru.html](https://www.analog.com/ru/about-adi/news-room/press-releases/2012/10-12-2012_ad7176_ru.html)

(Дата обращения: 02.05.2019).

45. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

46. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

47. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях».

48. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий».

49. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».

50. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

51. СанПиН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».

52. СанПиН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий».

53. ГОСТ Р 56222-2014. Ресурсосбережение. Обращение с отходами.

54. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

55. Статья 1085 ГК РФ «Объем и характер возмещения вреда, причиненного повреждением здоровья».

56. Статья 1064 ГК РФ «Общие основания ответственности за причинение вреда».

57. Статья 151 ГК РФ «Обязательства вследствие причинения вреда».

58. Статья 1101 ГК РФ «Способ и размер компенсации морального вреда».

Приложение А  
(обязательное)

Раздел № 2

Mathematical model of the baggage and hand luggage inspection system with the  
function of recognition of materials

Студент:

| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                     | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|---------------|--------------------------------|----------------|-------------|
| 1БМ71         | Конюшков Константин Алексеевич |                |             |

Консультант ОКД ИШНКБ:

| <b>Должность</b>                      | <b>ФИО</b>                | <b>Ученая<br/>степень,<br/>звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------|
| Ведущий научный<br>сотрудник РКНЛ РКД | Осипов Сергей<br>Павлович | к.т.н.                                |                |             |

Консультант – лингвист отделения ОИЯ:

| <b>Должность</b>         | <b>ФИО</b>                     | <b>Ученая<br/>степень,<br/>звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------|
| Старший<br>преподаватель | Новикова Вера<br>Станиславовна |                                       |                |             |

## **2 Mathematical model of the baggage and hand luggage inspection system with the function of recognition of materials**

In this section, a mathematical model of the system of inspection of baggage and hand luggage with the function of recognition of materials of the object of control will be considered. The recognition method is based on the implementation of the method dual energy, based on the recording of X-rays by multi-channel linear detectors, each of which is a sandwich detector. The specificity of the sandwich detector is related to its design, which allows dividing X-ray radiation into predominantly soft and predominantly solid components.

The developed mathematical model consists of a number of basic blocks and is based on the description of the structure of the analyzed inspection control system and the geometrical scheme for the formation of primary radiographic images (scanning scheme).

### **2.1 The structure of the inspection complex baggage and hand luggage and scanning scheme of objects of control**

The analyzed inspection complex in accordance with the modern approach to design consists of several main parts: X-ray source; X-ray recorder; algorithms and programs for the formation and processing of information.

The inspection system for baggage and hand luggage consists of an X-ray source 4 with radiation protection 1 and a slit collimator 5, a linear detector 3, and a conveyor for moving the monitored object 2 with light sensors to notify the system that the object 7 is entering control zone 6. In Figure 1, numeral 8 identifies a portion of the control object to form a pair of columns (radiographic images with L and H indexes) from the radiographic images of the control object. The primary radiographic images of  $\mathbf{J}_L$  and  $\mathbf{J}_H$  are formed by continuous scanning of the entire object. The index L corresponds to the image obtained from the sandwich detector nearest to the x-ray source, and to the index H – from the far sandwich detector. The “running” image (s) is reflected (displayed) on the monitor. Note that the primary

radiographic images JL and JH can be processed by the information processing algorithm in the method dual energy according to the corresponding pairs of columns. This leads to an increase in the performance of the inspection control system.

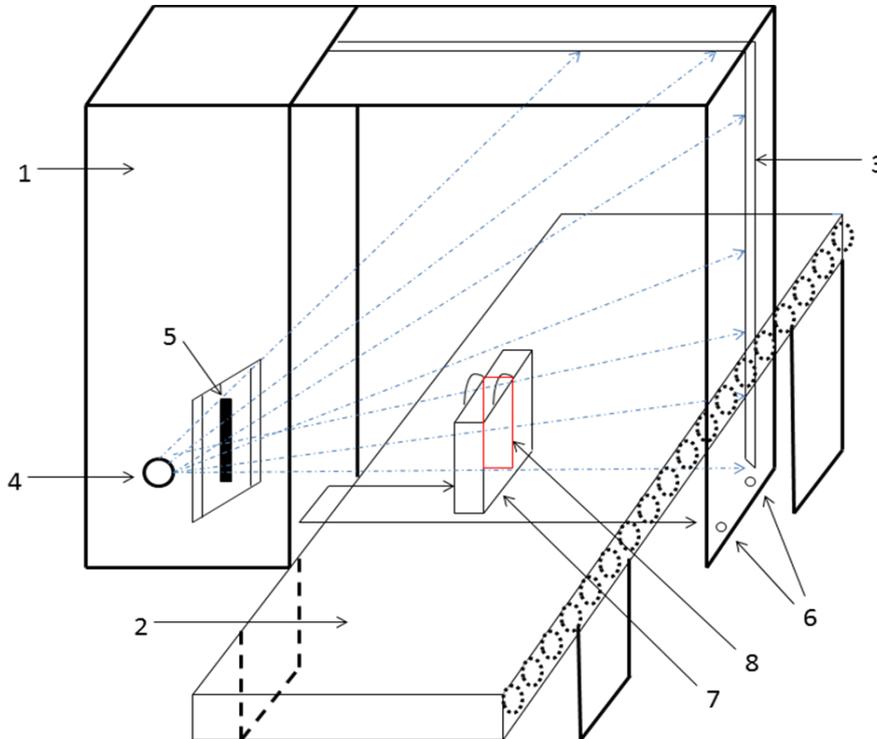


Figure 1 – Geometric control scheme:

1 - housing with protection; 2 - conveyor; 3 - linear detector; 4 - radiation source; 5 - slit collimator; 6 - light sensors; 7 - object of control; 8 - illuminated area for the formation of a pair of columns of the image of the object

It should be noted that for the convenience of system operators and to increase the probability of detecting fragments prohibited for transportation, a stationary mode is provided for analyzing the primary radiographic images and images of the recognition parameter with the possibility of rescanning with modes that allow for more detailed study of the internal structure of the object.

The centers of the detectors in the bremsstrahlung radiation recorders can be located in a straight line, L-shaped (Figure 1) and along a circular arc. The most rational positioned detectors around the circumference.

## 2.2 Initial parameters of the mathematical model of the baggage and hand luggage inspection complex with a material recognition function

The only possible type of ionizing radiation source in relation to the problem in question is an X-ray machine. The use of radionuclides of gamma-radiation is hypothetically possible, but radiation safety standards impose strict protection requirements.

We list the parameters of the developed mathematical model.

*X-ray source:*

- radiation mode – continuous or pulsed;
- maximum x-ray energy –  $E_{\max}$ ;
- numerical energy spectrum  $f(E, E_{\max})$ ;
- high-voltage U and current I;
- photon flux intensity at a distance of 1 meter from the radiation source –  $N_0$ ;
- effective atomic number of the material –  $Z$ .

*X-ray recorders:*

- registration mode – integral, counting or spectrometric implementation of the counting method;
- recorder type – combined, direct conversion;
- transverse dimensions of the photovoltaic converter –  $a_d \times b_d$ ;
- effective atomic number, material density, and thickness of the L-detector of the sandwich –  $Z_L, \rho_L, h_L$ ;
- effective atomic number, material density, and thickness of the intermediate filter of the sandwich –  $Z_F, \rho_F, h_F$ ;
- digit capacity of the ADC of the L- and H-detectors of the sandwich –  $k_L$  and  $k_H$ ;
- formation time of one pair of columns of radiographic images – T;
- average levels and standard deviations of «dark» signals for L- and H-detectors of a sandwich –  $\Phi_L, \sigma_L$  and  $\Phi_H, \sigma_H$ .

Dwell on the arcuate X-ray recorder.

Geometric scanning scheme:

– distance from the center of the radiating surface of the radiation source to the arc of the X-ray recorder;

– arc length of the x-ray recorder –  $L_X$ .

### **2.3 Mathematical model of the formation of primary radiographic images in the system of inspection of baggage and hand baggage in the mode method dual energy**

The basis of the mathematical model of any of the implementations of digital radiography systems or computed tomography is the model of the formation of primary x-rays or projections. The method dual energy is essentially two-energy digital radiography. Let us dwell on the description of the mathematical model of the formation of primary radiographic images in the system of inspection of baggage and hand luggage in the mode of the method dual energy.

At the first stage, it is necessary to make a number of important assumptions.

*The first assumption.* Let sandwich detectors be located in an arc with a center at the radiating point (radius of the arc  $F$ ). We emphasize that such an assumption will significantly simplify the mathematical model being developed. The numerical normalized energy spectrum of the x-ray source with the maximum energy  $E_{\max}$  is described by the function  $f(E, E_{\max})$

$$\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) dE = 1. \quad (2)$$

The energy spectrum  $f(E, E_{\max})$  is approached by various formulas for small (Kramer's formula) and high maximum energies of the x-ray source (Schiff formula) [24–26]. By virtue of the general physical regularities of the formation of X-ray and bremsstrahlung based on the deceleration of accelerated electron beams in the target material, similar formulas can be used to describe  $f(E, E_{\max})$ .

*The second assumption.* The distance from the x-ray source to the detectors  $F$  (focal length) is large compared to the thickness of the radiation-sensitive volume –  $F \gg (h_L \wedge h_H)$ ; The transverse dimensions of the phototransducer are significantly smaller than the focal length –  $(a_d \wedge b_d) \ll F$ .

The number of photons  $n(E)$  with energy  $E$  falling on the front surface of the sandwich detector during time  $T$  with the above assumptions is estimated by the formula

$$n(E) = \frac{N_0 T a_d b_d}{F^2} f(E, E_{\max}) = n_0 f(E, E_{\max}). \quad (3)$$

From the analysis of expression (3), it follows that in accordance with the definition introduced,  $n_0$  is a generalized parameter that is numerically equal to the integral number of photons that hit the front surface of the sandwich detector during  $T$ . The introduction of the parameter  $n_0$  significantly reduces the number of parameters of the mathematical model under development and allows, if necessary, to compare different X-ray recorders with each other for different geometrical schemes for the formation of primary radiographic images.

*Third assumption.* Assume no light energy loss in each sandwich detector.

In this case, the equations for the connection of analog signals  $J_L$  and  $J_H$  with the parameters of the control object  $(\rho h, Z)$  and the variable parameters of the complex, taking into account the noise, are

$$\begin{aligned} I_L(\rho H, Z) &= \int_0^{E_{\max}} E_L(E) n(E) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon_L(E) dE + \Phi_L(\rho H, Z) \\ I_H(\rho H, Z) &= \int_0^{E_{\max}} E_H(E) n^*(E) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon_H(E) dE + \Phi_H(\rho H, Z), \end{aligned} \quad (4)$$

where  $n^*(E) = n(E) e^{-m(E, Z_L) \rho_L h_L - m(E, Z_F) \rho_F h_F}$ ;  $E_L(E)$ ,  $E_H(E)$  – the dependence of the average energy of the detected photon in the first and second radiation-sensitive volume on the photon energy;

$\varepsilon_L(E) = 1 - e^{-m(E, Z_L) \rho_L h_L}$ ,  $\varepsilon_H(E) = 1 - e^{-m(E, Z_L) \rho_L h_L}$  – registration efficiency for the first and second sandwich detectors depending on energy;

$m(E,Z)$ ,  $m(E,Z_L)$ ,  $m(E,Z_H)$ ,  $m(E,Z_F)$  – the dependence of the mass attenuation coefficient for materials of the control object, the first and second radiation-sensitive volume and the additional filter on the energy;

$\Phi_L$ ,  $\Phi_H$  – noise for the first and second detector of the sandwich detector, which additively include the «dark» signals from the detectors with the corresponding noise levels.

Random variables  $\Phi_L$ ,  $\Phi_H$  for the integral registration mode are distributed on Gauss with the parameters  $\xi_L$ ,  $\sigma_L$  and  $\xi_H$ ,  $\sigma_H$

$$\begin{aligned}\xi_L &= \Phi_{DL}, \xi_H = \Phi_{DH}, \\ \sigma_L(\rho H, Z) &= \sqrt{\int_0^{E_m} \overline{E_L^2(E)} n(E) e^{-m(E,Z)\rho H} \varepsilon_H(E) dE}, \\ \sigma_H(\rho H, Z) &= \sqrt{\int_0^{E_{\max}} \overline{E_H^2(E)} n^*(E) e^{-m(E,Z)\rho H} \varepsilon_H(E) dE},\end{aligned}\quad (5)$$

where  $\overline{E_L^2(E)}$ ,  $\overline{E_H^2(E)}$  – the average values of the square of the energy of the registered photon with energy E in the first and second radiation-sensitive volume;

$\Phi_{DL}$ ,  $\sigma_L$  and  $\Phi_{DH}$ ,  $\sigma_H$  – average levels of dark signals. It is assumed that the «dark» signals are distributed according to a truncated Gauss law with the parameters  $\Phi_{DL}$ ,  $\sigma_{DL}$  and  $\Phi_{DH}$ ,  $\sigma_{DH}$ .

Expressions (3) – (5) are the basis of a mathematical model of the formation of primary virtual radiographic images in the inspection system of baggage and hand luggage in the mode method dual energy, can be transformed into a simulation algorithm and a program that represents a virtual inspection complex with the recognition function materials of objects, as they allow numerical simulation of the process of generating analog signals.

For this, the first terms in system (4) are calculated, and the values of random variables  $\Phi_L$ ,  $\Phi_H$  can be calculated by the formulas [22]

$$\begin{aligned}\Phi_L(\rho H, Z) &= \sqrt{-2 \ln \zeta_1} \cos(2\pi\zeta_2) \sigma_L(\rho H, Z) + \sqrt{-2 \ln \zeta_1} \sin(2\pi\zeta_2) \sigma_{DL} + \Phi_{DL}, \\ \Phi_H(\rho H, Z) &= \sqrt{-2 \ln \zeta_3} \cos(2\pi\zeta_4) \sigma_H(\rho H, Z) + \sqrt{-2 \ln \zeta_3} \sin(2\pi\zeta_4) \sigma_{DL} + \Phi_{DL},\end{aligned}\quad (6)$$

where  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$  – random (pseudo-random) values uniformly distributed over the interval (0,1).

Subroutines for calculating such random variables are available in all programming languages and systems for mathematical calculations, for example, in MathCad, the built – in function rnd (1). Analog signals from the output of the photodetector  $I_L$  and  $I_H$  are fed to the input of the ADC, in which they are transformed into digital signals  $D_L$  and  $D_H$

$$D_L(\rho H, Z) = \text{int} \left( \frac{I_L(\rho H, Z)}{\Delta_L} \right), D_H(\rho H, Z) = \text{int} \left( \frac{I_H(\rho H, Z)}{\Delta_H} \right), \quad (7)$$

where  $\Delta_L, \Delta_H$  – analog signal values for sandwich detectors corresponding to a digital signal unit.

In the simplest case,  $\Delta_L = \Delta_H = \Delta$ . Note that sandwich detectors can be equipped with an ADC with different resolution –  $k_L, k_H$ . The values of  $\Delta_L, \Delta_H$  are related to the digit capacity of the ADC  $k_L, k_H$  ratios

$$\Delta_L = \frac{C_L I_L(\rho_{air} H_{air}, Z_{air})}{2^{k_L} - 1}, \Delta_H = \frac{C_H I_H(\rho_{air} H_{air}, Z_{air})}{2^{k_H} - 1}, \quad (8)$$

where the air index refers to the measurement of the attenuation by air; the coefficients  $C_L > 1, C_H > 1$  are entered to protect the ADC from overflow.

Addition (6) – (8) to the mathematical model of the formation of primary virtual radiographic images in the system of inspection of baggage and hand luggage in the mode of the method dual energy turns it into a full-fledged model of forming digital radiographic images.

## **2.4 Mathematical model of transformation of primary radiographic images into images of a recognition parameter**

In any of the implementations of the method dual energy, the digital signals  $D_L$  and  $D_H$  calibrated by “black” and “white” are input to a specialized algorithm, the main purpose of which is to evaluate the material recognition parameter of the control object  $p$ . There are several approaches to the recognition of materials.

System (4) consists of two integral parametric equations for two parameters of the control object – the mass thickness  $\rho H$  and the effective atomic number  $Z$ . These parameters can be obtained directly from the system of equations (4). In this approach, the evaluation of the effective atomic number  $Z$ ,  $p = Z$ , is the recognition parameter  $p$ . The limitation of this approach is the lack of smoothness of the two-dimensional function  $m(E, Z)$  with respect to  $Z$ .

The most common approach to material recognition is the approach based on using the ratio  $Q$  as a recognition parameter of the thickness estimates for the free path lengths  $D_L$  and  $D_H$  for the predominantly “soft” and mostly “hard” components of x-ray radiation.

$$Q = \frac{\ln(D_L/D_{L0})}{\ln(D_H/D_{H0})} = \frac{Y_L}{Y_H}, \quad (9)$$

where  $D_{L0}$  and  $D_{H0}$  – digital signals from the first and second detectors without the object of control.

The recognition parameter  $p = Q$  depends on the maximum energy  $E_{\max}$ , the mass thickness of the object control  $\rho H$  and the effective atomic number  $Z$ .

Regardless of the physical interpretation of the recognition parameter, practical implementations of the recognition methods are based on the calibration tests stage of specially organized test objects. Test objects consist of fragments with parameters  $(\rho H, Z)$  from a zone of consumer interest. The experimental dependences of  $Y_L(\rho H, Z)$  and  $Y_H(\rho H, Z)$  are preliminarily formed.

The content of the next stage of the information processing algorithm depends on the approach to estimating the recognition parameter  $p$ .

#### 2.4.1 Recognition parameter $p = Z$

In this case, the experimental dependences of  $Y_L(\rho H, Z)$  and  $Y_H(\rho H, Z)$  are transformed into continuous gauge functions  $F_L(\rho H, Z)$  and  $F_H(\rho H, Z)$  that are monotonic continuous in  $\rho H$  and  $Z$ . The definition of the unknown's  $\rho H$  and  $Z$  is reduced to equating the calibration functions to the corresponding experimental estimates of the thickness of the control object and solving the system of equations

$$\begin{aligned} F_L(\rho H, Z) &= Y_L \\ F_H(\rho H, Z) &= Y_H \end{aligned} \quad (10)$$

Compliance with the requirements of continuity, smoothness and strict monotonicity of the functions  $F_L(\rho H, Z)$  and  $F_H(\rho H, Z)$  ensures the existence and uniqueness of the solution of the system of equations (10) with respect to  $\rho H$  and  $Z$ .

The recognition of materials, which is reduced to a correlation to one of the classes, occurs according to the assessment of the belonging of the  $Z$  estimate to one of the intervals of change of the effective atomic number corresponding to the class of materials.

#### 2.4.2 Recognition parameter $p = Q$

In this case, the experimental dependences  $Y_L(\rho H, Z)$  and  $Y_H(\rho H, Z)$  obtained as a result of testing the test object are converted into a set of calibration functions  $Q(Y_L) = Y_L(\rho H, Z) / Y_H(\rho H, Z)$ .

A simplified set is formed for all sets of levels  $Z$ , with each level  $Z_i$ ,  $i=1 \dots i_0$  associated with its class of recognizable materials. Here  $i_0$  – is the number of recognizable classes. A set of functions of the  $Q_{i-}(Y_L)$  and  $Q_{i+}(Y_L)$  level functions is constructed from the set of gauge functions  $Q_i(Y_L)$ ,  $i \leftrightarrow Z_i$ ,  $i=1 \dots i_0$ . Naturally put forward a requirement for the functions of levels

$$\forall i \in (1, i_0) \wedge \forall j \in (1, i_0), i \neq j \Rightarrow (Q_{i-}(Y_L), Q_{i+}(Y_L)) \cap (Q_{j-}(Y_L), Q_{j+}(Y_L)). \quad (11)$$

Expression (11) is a rule for classifying the material of a test object (fragment) to a certain class of materials.

Note that the functions  $Q_i(Y_L)$  must be renumbered in ascending order. In the intervals of change in  $Y_L$ , in which the order of increasing functions is violated, it is impossible to correctly recognize the material.

The restriction (11) can be supplemented by one more restriction, which allows making a conclusion about the uncertainty of the recognition of materials. This limitation is described by the relation

$$\forall i \in (1, i_0 - 1), j = i + 1 \Rightarrow (Q_{i-}(Y_L), Q_{i+}(Y_L)) \cup (Q_{j-}(Y_L), Q_{j+}(Y_L)) \neq (Q_{i-}(Y_L), Q_{j+}(Y_L)). \quad (12)$$

The material belongs to the class associated with the effective atomic number  $Z_i$ , if the following constraint is satisfied

$$Q_{ex} \in (Q_{i-}(Y_L), Q_{i+}(Y_L)). \quad (13)$$

For high-energy X-rays ( $E_m > 2$  MeV) and the classical implementation of the method dual energy (formation of radiographic images for two maximum energies), it was proved that mass thickness intervals exist for which correct (single-valued) recognition of materials by the level lines method is impossible [18].

Similar intervals exist for X-rays with  $E_m < 400$  keV, including for the analyzed implementation of the method dual energy. It is expected that in the implementation of the method dual energy being studied, in contrast to the classical implementation, the introduction of X-ray pre-filtering will not expand the range of mass thicknesses with reliable recognition of materials.

There is an alternative to the rule (13) of classifying the material of the test object (fragment) to a certain class of materials. The material according to the alternative rule belongs to class  $i$ , if the following relationship holds

$$\min_{j=1\dots i} |Q_{ex} - Q_j(Y_L)| = |Q_{ex} - Q_i(Y_L)|. \quad (14)$$

The rule based on the relation (14) does not require additional definition of level functions, therefore it is simpler in practical implementation.

The set of expressions (2)–(14) is a mathematical model of the baggage and hand baggage inspection system with the function of recognizing materials and their fragments using method dual energy based on the separation of predominantly “soft” and predominantly “hard” components of X-ray radiation, carried out by the elements of the sandwich detector.

Приложение Б  
(справочное)  
ПЛАН ЭВАКУАЦИИ

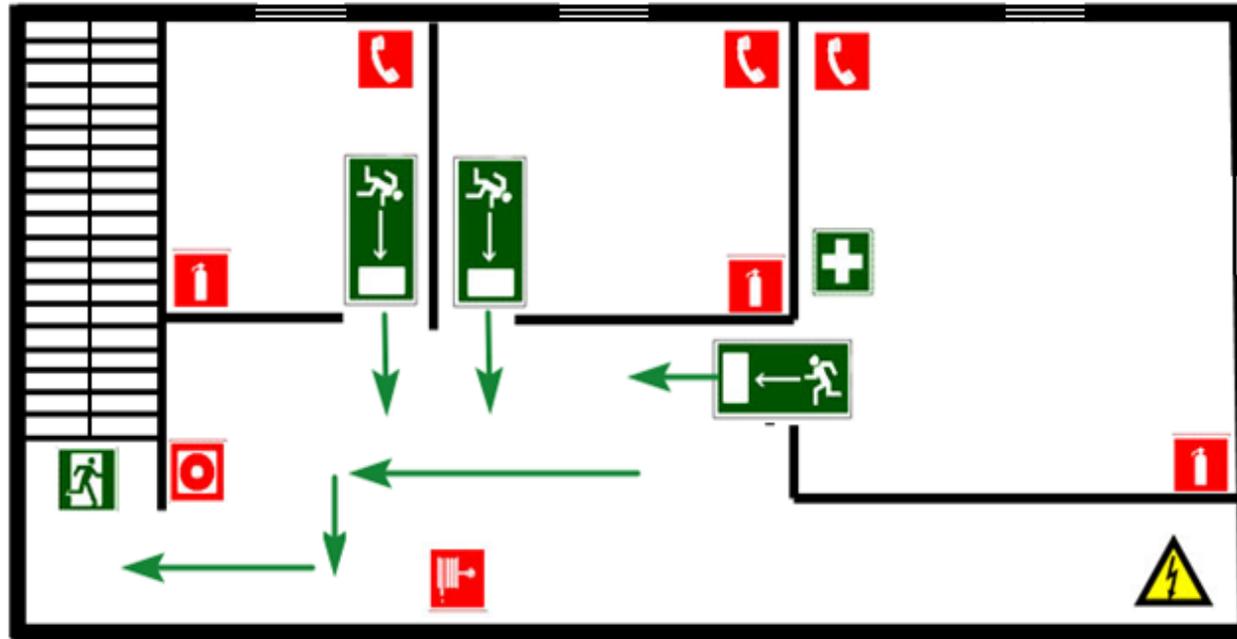
Утверждаю

---

---

---

ПРИ ПОЖАРЕ  
ЗВОНИТЬ **01**



Условные обозначения:

 – Огнетушитель

 – Электроцит

 – Телефон

 – Аптечка

 – Пожарный кран

 – Кнопка включения пожарной автоматики

 – Эвакуационный выход

 – Направление движения к эвакуационному выходу

 – Вы находитесь здесь

Приложение В  
(справочное)

Таблица В.1 – Линейные детекторы

| Серия   | Размеры конструкции для туннелей, мм                  | Диапазон энергий, кэВ | Шаг пикселя, мм          | Интерфейс данных                |
|---|---|-----------------------|--------------------------|---------------------------------|
| X-SCAN L  | 500×300<br>600×400<br>650×550<br>750×550<br>1000×1000 | 140–200               | 1.5<br>0.8<br>1.6<br>2.5 | Ethernet<br>USB                 |
| X-SCAN P  | 500×300<br>600×400<br>650×550<br>750×550<br>1000×1000 | 40–110                | 0.4<br>0.8               | Gigabit Ethernet<br>Camera Link |
| X-SCAN U  | 500×300<br>600×400<br>650×550<br>750×550<br>1000×1000 | 30–160                | 0.4<br>0.8               | Gigabit Ethernet                |
| X-SCAN C  | 500×300<br>600×400<br>650×550<br>750×550<br>1000×1000 | 30–160                | 0.2<br>0.4<br>0.8        | Ethernet                        |
| X-SCAN F  | 500×300<br>600×400<br>650×550<br>750×550<br>1000×1000 | 40–225                | 0.4<br>0.8<br>1.0<br>1.5 | Ethernet                        |
| X-SCAN H<br>(Материал сцинтиллятора CdWO <sub>4</sub> )   | 500×300<br>600×400<br>650×550<br>750×550<br>1000×1000 | 225–800               | 0.2<br>0.4               | Ethernet                        |
| X-SCAN LCS<br>(Материал сцинтиллятора CdWO <sub>4</sub> ) | 500×300<br>600×400<br>650×550<br>750×550<br>1000×1000 | 450 кэВ–9 мэВ         | 2.3<br>4.6<br>9.2        | Ethernet                        |
| X-SCAN M<br>(Материал сцинтиллятора CdWO <sub>4</sub> )   | 500×300<br>600×400<br>650×550<br>750×550<br>1000×1000 | 450 кэВ–9 мэВ         | 0.2<br>0.4               | Ethernet                        |

Приложение Г  
(справочное)

Таблица Г.1 – Рентгеновские аппараты непрерывного действия

| Производитель<br>(страна)             | Технические параметры       |   |                            |  |  |   |
|---------------------------------------|-----------------------------|---|----------------------------|--|--|---|
|                                       | Модель                      | Диапа-<br>зон<br>напряже-<br>ний,<br>кВ | Диапа -<br>зон тока,<br>мА | Размер<br>фокусно -<br>го пятна,<br>мм | Угол<br>выхода<br>излуче -<br>ния,<br>градус | Мах<br>просвечивае -<br>мая толщина<br>стали в мм |
| Valteau,<br>Бельгия                   | GFD-165                     | 160                                     | 3-5                        | 1.5×1.5                                | 55×40  | 18  |
|                                       | GFC-165                     | 160                                     | 3-5                        | 0.4×0.9                                | 360×40                                       | 14  |
|                                       | GFD-208                     | 200                                     | 5-8                        | 2.5×2.5                                | 60×40  | 35  |
|                                       | GFC-205                     | 200                                     | 3-5                        | 0.5×1.2                                | 360×45                                       | 25  |
|                                       | GFD-306                     | 300                                     | 4-6                        | 3.2×3.2                                | 60×40  | 56  |
|                                       | GFC-305                     | 300                                     | 3-5                        | 0.5×1.3                                | 360×40                                       | 48  |
| Rich. Seifert,<br>Германия            | ERESCO<br>42 MF<br>(200 MF) | 20-200                                  | 0.5-10                     | 1.5×1.5                                | 60×40  | 42  |
|                                       | ERESCO<br>42 MF             | 20-200                                  | 0.5-10                     | 1.5×1.5                                | 60×40  | 42  |
|                                       | ERESCO<br>36 MFC            | 20-200                                  | 0.5-10                     | 1.5×1.5                                | 360×38                                       | 36  |
|                                       | ERESCO<br>32 MF             | 20-275                                  | 0.5-10                     | 0.3×3.0                                | 360×38                                       | 32  |
|                                       | ERESCO<br>60 MF             | 20-275                                  | 0.5-10                     | 1.5×1.5                                | 60×40  | 60  |
|                                       | ERESCO<br>65 MF             | 20-300                                  | 0.5-10                     | 1.5×1.5                                | 60×40  | 65  |
| ООО<br>«Диагностика-<br>М»,<br>Россия | РАП 110-<br>10              | 30-100                                  | 0.5-10                     | 1.4×1.4                                | 360×40                                       | 8   |
|                                       | РАП 160-<br>5               | 40-160                                  | 0.4-5                      | 1.2×1.2                                | 360×40                                       | 11  |
|                                       | РАП<br>190П-5               | 160-190                                 | 4-5                        | 1.4×1.4                                | 360×40                                       | 11  |
|                                       | РАП 200-<br>5               | 150-200                                 | 0.3-5                      | 2.0×2.2                                | 60×40  | 22  |
|                                       | РАП 220-<br>5               | 50-220                                  | 0.3-5                      | 2.0×2                                  | 60×40  | 35  |
|                                       | РАП<br>3000-5               | 70-300                                  | 0.7-5                      | 2.5×2.5                                | 60×40  | 48  |
| ICM,<br>Бельгия                       | SITE-X<br>C1603             | 50-160                                  | 1-3                        | 0.4×0.5                                | 360×40                                       | 10  |
|                                       | SITE-X<br>C2254             | 20-225                                  | 1-4                        | 0.5×0.5                                | 360×40                                       | 39  |
|                                       | SITE-X<br>C2257             | 20-225                                  | 1-7                        | 0.5×0.5                                | 360×40                                       | 44  |
|                                       | SITE-X<br>C2258             | 20-225                                  | 1-8                        | 2.5×2.5                                | 60×40  | 45  |

|                      |                 |         |       |         |        |    |
|----------------------|-----------------|---------|-------|---------|--------|----|
|                      | SITE-X<br>C3003 | 100-300 | 1-3   | 0.5×0.8 | 360×40 | 55 |
|                      | SITE-X<br>C3005 | 100-300 | 1-5   | 0.5×0.8 | 360×40 | 60 |
| Lorad,<br>США        | LPX 160         | 5-160   | 0.1-5 | 1.5×1.5 | 360×40 | 14 |
|                      | LPX 200         | 10-200  | 1-10  | 1.5×1.5 | 360×40 | 25 |
| Gilardoni,<br>Италия | GXL 208<br>D    | 200     | 8     | 2.3×2.3 | 50×40  | 35 |
|                      | GXL 306<br>D    | 300     | 6     | 3.0×3.0 | 55×40  | 55 |
|                      | GXL 205<br>PO   | 200     | 5     | 0.4×0.4 | 360×45 | 28 |
|                      | GXL 305<br>PO   | 300     | 5     | 0.5×0.5 | 360×45 | 50 |
|                      | GXL 375<br>D    | 370     | 5     | 3.0×3.0 | 50×40  | 70 |
| Pantak,<br>США       | 100 GS-B        | 20-100  | 5     | 1.0×1.0 | 360×24 | 5  |
|                      | 200EG-<br>SP2   | 90-200  | 5     | 2.0×2.0 | 360×25 | 20 |
|                      | 200EG-<br>B1-C  | 120-200 | 5     | 1.0×0.5 | 360×24 | 32 |
|                      | 200EG-S3        | 70-200  | 5     | 2.0×2.0 | 360×25 | 25 |
|                      | 200EG-<br>B2-F  | 160-250 | 5     | 1.0×2.4 | 360×25 | 43 |
|                      | 250EG-S3        | 110-250 | 5     | 2.0×2.0 | 360×25 | 48 |
|                      | 300EG-<br>B2-F  | 200-300 | 5     | 1.0×2.5 | 360×25 | 55 |
|                      | 300EG-S3        | 160-300 | 5     | 2.5×2.5 | 360×25 | 60 |