

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

Школа Базовой инженерной подготовки
Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение
Отделение школы Отделение контроля и диагностики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка адаптивного метода оценки характеристик инспекционных досмотровых комплексов с функцией распознавания материалов объектов контроля

УДК 620.179.152

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
151Б40	Ван Цзяшуо		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. Преподаватель	Николаенко В.С.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ларионова Е.В.	к. х. н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Приборостроение	Мойзес Б.Б	к. т. н.		

Томск – 2018 г

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<i>Профессиональные компетенции</i>
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения
P2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Эксплуатировать и обслуживать современные средства измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества
P4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе
P6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции
	<i>Универсальные компетенции</i>
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности

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

Школа Базовой инженерной подготовки
 Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение
 Отделение школы Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
151Б40	Ван Цзяшуо

Тема работы:

Разработка адаптивного метода оценки характеристик инспекционных досмотровых комплексов с функцией распознавания материалов объектов контроля

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Инспекционный досмотровый комплекс Томского политехнического университета
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Исследовать влияние нестабильности параметров пучка импульсного тормозного излучения на точность определения параметров распознавания. Экспериментально исследовать трансформацию шумов в методе дуальных энергий. Разработать алгоритм измерения флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения. Разработать программу в системе математических вычислений MathCad для оценки флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения. Экспериментально оценить флуктуации параметров импульсного тормозного излучения.
Перечень графического материала	1. Схемы 2. Изображения 3. Графики
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	
Социальная ответственность	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
151Б40	Ван Цзяшуо		

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

Студенту:

Группа	ФИО
151Б40	Ван Цзяшуо

Институт	ШБИП	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Бакалавриат	Направление / специальность	Приборостроение

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

<ol style="list-style-type: none"> 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических; энергетических; финансовых; информационных; человеческих; 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов; 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования. 	<p>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; опрос</p>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<ol style="list-style-type: none"> 1. Расчет трудоемкости этапов; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Формирование плана работ по разработке проекта; 2. Планирование потребности в человеческих ресурсах; 3. Обоснование необходимых инвестиций для внедрения инженерного решения; 4. Составление бюджета внедрения инженерного решения 5. Оценка организационной эффективности проекта
--	---

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Николаенко В.С.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
гр. 151Б40	Ван Цзяшуо		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
151Б40	Ван Цзяшуо

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является экспонированная рентгеновская пленка, которая будет подвергнута оцифровке при помощи специального сканирующего устройства. Областью применения является радиационный метод неразрушающего контроля (дефектоскопия).
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	Повышенная яркость света; Нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда); Повышенный уровень электромагнитного излучения Отклонение показателей микроклимата Поражение электрическим током
2. Экологическая безопасность:	Вещества, образующиеся после утилизации экспонированной рентгеновской пленки
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Пожары. Удары электрическим током при эксплуатации оборудования.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Перечень нормативных документов

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Штейнле А.В.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
151Б40	Ван Цзяшуо		

Реферат

Всего 97 с., 10 рисунков, 14 таблиц, 31 источник, 1 приложение

Ключевые слова: импульсное рентгеновское излучение, бетатрон, нестабильность параметров пучка, распознавание материалов.

Объектом исследований являются материалы крупногабаритных объектов досмотрового контроля. Предмет исследования – алгоритмы формирования и обработки радиографических изображений в инспекционных досмотровых комплексах с функцией распознавания материалов объектов досмотрового контроля высокоэнергетическим методом дуальных энергий для импульсных источников тормозного излучения. Цель работы – исследовать влияние флуктуаций параметров пучка тормозного излучения от импульса к импульсу на качество распознавания материалов методом дуальных энергий, разработать способ оценки флуктуаций параметров пучка и включить его в алгоритм распознавания материалов и экспериментально проверить применимость его на практике. Экспериментально исследовано влияние флуктуаций параметров высокоэнергетического пучка тормозного излучения от импульса к импульсу на качество распознавания материалов методом дуальных энергий. Разработан способ оценки флуктуаций параметров пучка и включён в алгоритм распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов. Эксперименты проводились на досмотровом комплексе НИ ТПУ с источниками высокоэнергетического тормозного излучения – бетатронами МИБ 4/9 и МИБ 4/7,5. Доказана возможность отслеживания параметров высокоэнергетического источника тормозного излучения в процессе эксплуатации инспекционного досмотрового комплекса с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий.

Оглавление

Список сокращений, обозначений.....	10
Введение.....	12
1 Влияние нестабильности параметров пучка импульсного тормозного излучения на точность определения параметров распознавания.....	18
1.1 Модель формирования исходных радиографических изображений метода дуальных энергий.....	19
1.2 Оценка дисперсий сигналов после предварительной обработки.....	23
1.3 Оценка среднеквадратических отклонений параметров распознавания материалов методом дуальных энергий.....	24
1.3.1 Распознавание по эффективному атомному номеру.....	24
1.3.2 Распознавание по методу линий уровней.....	26
2 Основы экспериментального исследования трансформации шумов в методе дуальных энергий.....	28
2.1 Подходы к экспериментальному исследованию темновых сигналов радиометрических детекторов.....	28
2.2 Оценка составляющих шумов на этапе калибровки по «белому».....	28
2.3 Флуктуации геометрического положения оси пучка тормозного излучения.....	31
2.4 Компенсация флуктуаций параметров импульсов тормозного излучения.....	33
3 Основы измерения флуктуаций параметров тормозного излучения..	35
3.1 Измерение флуктуаций мощности дозы излучения в импульсе.....	35
3.2 Измерение нестабильности максимальной энергии.....	40
3.3 Измерение нестабильности положения геометрической оси пучка	42
4 Особенности экспериментального исследования трансформации шумов в методе дуальных энергий.....	44

4.1 Подходы к экспериментальному исследованию темновых сигналов радиометрических детекторов.....	44
4.2 Оценка трансформации шумов на этапе калибровки по «белому».....	45
4.3 Оценка трансформации шумов на этапе применения схемы отношения..	47
5 Экспериментальная оценка косвенных информационных параметров технического состояния системы источник излучения – линейка радиометрических детекторов ИДК.....	50
5.1 Оценка темновых сигналов радиометрических детекторов и степени их однородности.....	52
5.2 Анализ радиометрических сигналов при измерениях по воздуху.....	54
5.3 Анализ сигналов со схемы отношения.....	58
6 Дополнения к программе Dual	60
7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	63
8 Социальная ответственность.....	79
Заключение	85
Список литературы	86
Приложение	90

Список сокращений и обозначений

Сокращения

ИДК – инспекционные досмотровые комплексы

ЦР – цифровая радиография

МДЭ – метод дуальных энергий

ТК – таможенный контроль

ОК – объект контроля

ОДК – объект досмотрового контроля

ПР – параметр распознавания

ТИ – тормозное излучение

ИТИ – источник тормозного излучения

ЛУЭ – линейный ускоритель электронов

ДТИ – детектор тормозного излучения

СД – сцинтилляционный детектор

АН – атомный номер

ЭАН – эффективный атомный номер

ЭР – эффективность регистрации

ФП – фотоприёмник

ППД – полупроводниковые детекторы

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ПК – производительность контроля

НРБ – нормы радиационной безопасности

ДСП – длина свободного пробега

ГД – Г-образный детектор

Обозначения

E_{\max} – максимальная энергия тормозного излучения, МэВ

E – энергия тормозного фотона

$g(E, E_{\max})$ – энергетический спектр тормозного излучения

F – фокусное расстояние

ρ – плотность материала ОДК

H – толщина материала ОДК

Z – атомный номер материала

Z_{eff} – эффективный атомный номер материала ОДК

ρH – массовая толщина ОДК

m – МКО материала ОДК

h – толщина СД

μ – ЛКО излучения материалом СД

$\varepsilon(E, h_d)$ – энергетическая зависимость ЭР тормозного излучения

$I(\varphi)$ – угловое распределение тормозного излучения

ΔZ – разрешение по ЭАН

Введение

Инспекционные досмотровые комплексы (ИДК) с функцией распознавания материалов крупногабаритных объектов досмотрового контроля (ОДК) и их структурных фрагментов продолжают оставаться одними из наиболее востребованных и эффективных технических средств таможенного контроля (ТК). Эти комплексы используются таможенными и пограничными органами, специализированными службами обеспечения безопасности пассажирских и грузовых перевозок авиационным, железнодорожным, морским и автомобильным видами транспорта. В настоящее время расширяется применение ИДК на предприятиях, связанных с выпуском изделий, подпадающих под различные международные, региональные и внутренние ограничения. Понятие «распознавание материалов» применительно к рассматриваемым задачам эквивалентно «идентификации материалов» и «дискриминации материалов». Под распознаванием материалов понимается отнесение материала ОДК по некоторому параметру распознавания (ПР) к одной из групп материалов. В качестве ПР выступает эффективный атомный номер (ЭАН) материала или функция от него. Значение ЭАН для элементов из периодической системы Менделеева совпадает с атомным номером (АН) элемента.

Распознавание материалов крупногабаритных ОДК осуществляется двумя основными реализациями высокоэнергетического метода дуальных энергий (МДЭ). В основу высокоэнергетического МДЭ положено разделение совокупного взаимодействия фотонного излучения с веществом на превалирующие эффекты: эффект Комптона и эффект рождения пар. Соответствующие массовые коэффициенты ослабления (МКО) или линейные коэффициенты ослабления (ЛК) излучения каждого из парциальных эффектов представляются в виде произведения энергетической функции, специфичной для рассматриваемого эффекта взаимодействия, и параметра, характеризующего ОК. Указанные параметры индивидуальны для материала

объекта, они называются параметрами МДЭ материала и зависят от его плотности и эффективного атомного номера. Оценки параметров МДЭ при необходимости оцениваются в результате обработки первичных радиографических изображений (РИ), сформированных для двух специальным образом подобранных максимальных энергий высокоэнергетического тормозного излучения. Меньшую максимальную энергию традиционно называют «Low energy», а большую максимальную энергию – «High energy».

Наибольшую популярность получили две реализации МДЭ, используемые для распознавания материалов. В первой реализации в качестве параметра распознавания материала выступает оценка ЭАН, а во второй – отношение толщин ОДК в длинах свободного пробега (ДСП) для «High energy» к радиационной толщине объекта для «Low energy». Упомянутое отношение зависит от ЭАН. Вторая реализации отличается простотой обработки и меньшей зависимостью от геометрии контроля.

Инспекционные досмотровые комплексы являются разновидностью систем высокоэнергетической цифровой радиографии (ЦР). ИДК имеют такие же потребительские характеристики, как и системы ЦР. К основным потребительским параметрам ЦР относятся: предельный радиационный контраст; пространственное разрешение; уровень шумов; производительность контроля (ПК). Качество ИДК с функцией распознавания материалов, помимо указанных выше параметров, характеризуется и дополнительным специфическим параметром – разрешением по эффективному атомному номеру.

Для высокоэнергетической реализации МДЭ в настоящее время достигнуто разрешение по ЭАН на уровне 6 единиц. Разрешение по ЭАН зависит от физической реализации способа распознавания материалов, методической погрешности оценки ПР, нормативной производительности контроля и минимальными размерами тени структурного фрагмента, материал которого распознаётся с заданной вероятностью.

В высокоэнергетической реализации МДЭ используются тормозное излучение (ТИ), в качестве источников тормозного излучения (ИТИ) выступают бетатроны и линейные ускорители электронов (ЛУЭ). Особенность таких источников излучения связана с импульсным режимом излучения, негативным проявлением которого является наличие значительных флуктуаций параметров ТИ от импульса к импульсу. К параметрам импульсов ТИ относят число сбрасываемых электронов, максимальную энергию излучения, геометрическое положение пучка излучения. Упомянутые флуктуации имеют статистическую природу и вносят значительный вклад в уровни шумов в исходных цифровых радиографических изображениях и в конечные уровни шумов изображений для распознавания материалов. Возможны два подхода к компенсации флуктуаций. Первый из них связан со статистической природой и основан на важнейшем законе статистики – погрешность оценки выборочного среднего с увеличением объёма выборки уменьшается пропорционально квадратному корню из объёма выборки. Второй подход основан на мультипликативном представлении исходных радиометрических сигналов, в котором первый из сомножителей является условно детерминированной величиной и равен среднему значению сигнала, а второй сомножитель представляет собой случайную величину с математическим ожиданием равным единице. В связи с описанным представлением радиометрических сигналов логично использовать для компенсации флуктуаций нормировку на показания детектора или группы детекторов, фронтальные поверхности которых не перекрываются тенями от ОКД. Первый подход к компенсации флуктуаций параметров импульсов излучения пригоден в случае невысоких требований к производительности ИДК или высокой частоте следования импульсов. Второй подход является более предпочтительным.

На первом этапе необходимо проведение предварительных теоретических и экспериментальных исследований по оценке влияния

нестабильности параметров пучка на точность оценки параметров идентификации для различных реализаций метода дуальных энергий.

Известно, что в процессе эксплуатации высокоэнергетических источников тормозного излучения в ИДК происходит изменение их параметров. В связи с вышеизложенным, не вызывает сомнения **актуальность дополнения алгоритма распознавания материалов в ИДК блоком оценки параметров ИТИ**, назначением которого является отслеживание негативных тенденций и обеспечение своевременности замены элементов ИТИ.

Предмет исследований – источники тормозного излучения в инспекционных досмотровых комплексах с функцией распознавания материалов крупногабаритных объектов и их фрагментов.

Объект исследований – алгоритмы измерения флуктуаций параметров тормозного излучения от импульса к импульсу и оценки их влияния на качество распознавания материалов в высокоэнергетических инспекционных досмотровых комплексах.

Цель работы – исследовать влияния флуктуаций параметров пучка тормозного излучения от импульса к импульсу на качество распознавания материалов методом дуальных энергий, разработать способ оценки флуктуаций параметров пучка и включить его в алгоритм распознавания материалов и экспериментально проверить применимость его на практике.

Для реализации указанной цели работы решаются следующие **основные задачи**:

- методом математического моделирования исследовать влияние нестабильности параметров пучка импульсного тормозного излучения на точность определения параметров распознавания;
- разработать алгоритм экспериментального исследования трансформации шумов в методе дуальных энергий;
- разработать алгоритм измерения флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения;

- разработать программу в системе математических вычислений MathCad для оценки флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения;

- провести экспериментальную оценку флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математического и физического моделирования, системного анализа, обработки изображений, корреляционного анализа и статистической обработки результатов экспериментальных исследований.

Научная новизна:

- дополнена математическая модель инспекционного досмотрового комплекса с функцией распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов блоком учёта нестабильности параметров пучка импульсного тормозного излучения;

- разработан алгоритм экспериментального исследования трансформации шумов в методе дуальных энергий;

- разработан алгоритм измерения флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения;

- разработана программа в системе математических вычислений MathCad для оценки флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения;

- проведена экспериментальная оценка флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в результате исследований алгоритмы обработки информации позволяют отслеживать техническое состояние источника излучения и системы детектирования в процессе эксплуатации инспекционных досмотровых комплексов, с целью выдачи своевременных и обоснованных рекомендаций на ремонт или замену источников тормозного излучения и системы детектирования.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований использованы для оценки нестабильности параметров источника тормозного излучения МИБ–9 при вариации максимальных энергий от 4 до 9 МэВ.

Апробация работы. Основные положения выпускной квалификационной работы докладывались на защите научно-исследовательских работ 2017–2018 годах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель инспекционного досмотрового комплекса с функцией распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов, дополненная блоком, предназначенным для учёта нестабильности параметров пучка тормозного излучения от импульса к импульсу;
- алгоритм экспериментального исследования трансформации шумов в методе дуальных энергий;
- алгоритм измерения флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения;
- программа в системе математических вычислений MathCad для оценки флуктуаций параметров импульсного тормозного излучения;
- совокупность экспериментальных оценок флуктуаций параметров тормозного излучения от импульса к импульсу.

1 Влияние нестабильности параметров пучка импульсного тормозного излучения на точность определения параметров идентификации

В научной литературе отмечается значимое влияние нестабильности параметров пучка импульсного тормозного (рентгеновского) излучения на точность оценки измеряемых характеристик объекта контроля [1–3]. В ряде работ приводятся данные по предельным уровням нестабильности характеристик высокоэнергетического тормозного излучения, в частности интенсивности излучения в импульсе, для конкретных типов ускорителей электронов [4–9]. Указанные уровни могут составлять от единиц до десятков процентов (см. рис. 1.1).

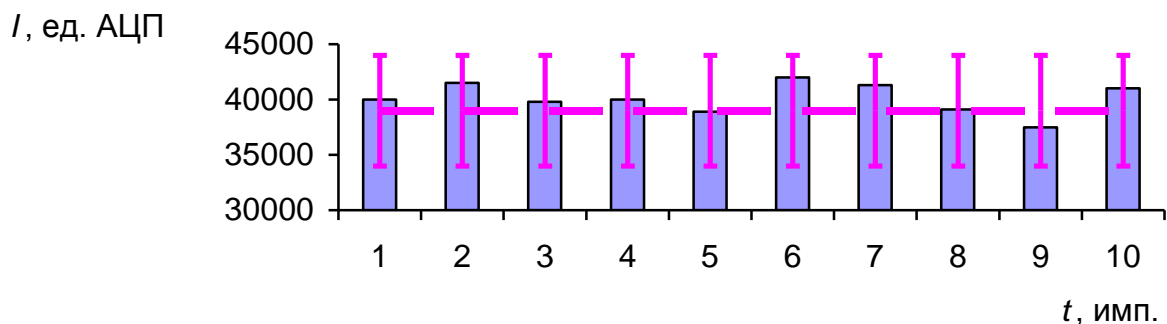


Рисунок 1.1 – Типичный вид последовательности сигналов от бетатрона:

— — средний уровень цифрового сигнала; I — среднеквадратическое отклонение сигнала

В работе [3] приведена математическая модель регистрации импульсного высокоэнергетического тормозного излучения, учитывающая нестабильность основных параметров пучка от импульса к импульсу. В этой работе продемонстрирована связь шумов исходных радиометрических сигналов с учётом флуктуации параметров пучка с погрешностью оценки толщины ОК. Естественно, что эти данные не могут быть использованы для оценки точности определения параметров распознавания в различных реализациях МДЭ. Однако подход, описанный в работе [3], в совокупности с математической моделью инспекционных досмотровых комплексов (ИДК) с

функцией распознавания материалов ОДК и их структурно разделённых фрагментов [9] позволяет исследовать влияние нестабильности параметров тормозного излучения от импульса к импульсу на качество распознавания материалов. Ниже остановимся на рассмотрении упомянутой задачи применительно к основным вариантам компенсации нестабильности параметров импульса тормозного излучения, к которым относится:

- аналоговое суммирование импульсов;
- нормировка сигналов с измерительных каналов на сигнал с опорного канала.

1.1 Модель формирования исходных радиографических изображений метода дуальных энергий

В инспекционных досмотровых комплексах крупногабаритных грузов, контейнеров и транспортных средств широко используется геометрическая схема контроля с Γ -образные линейки детекторов (рис. 1.2).

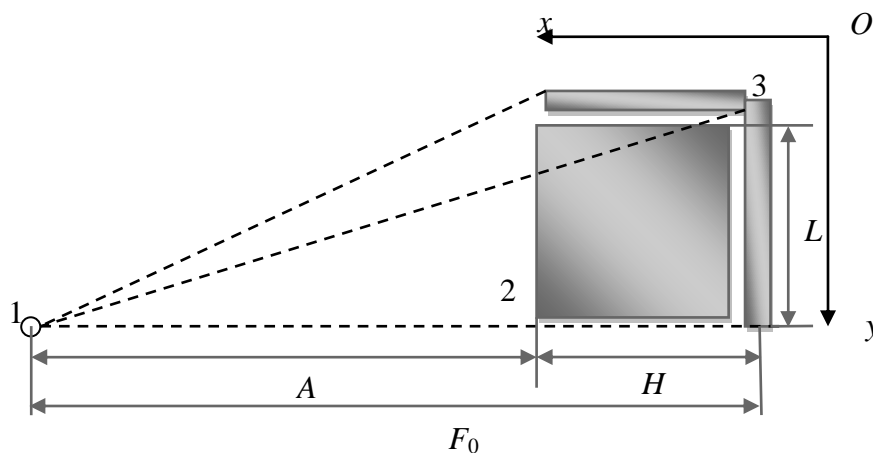


Рисунок 1.2 – Геометрическая схема досмотрового контроля

1 – источник излучения; 2 – объект контроля; 3 – линейка детекторов

Дополним математическую модель формирования исходных радиографических изображений [9] в ИДК учётом нестабильности

параметров пучка тормозного излучения от импульса к импульсу. Нестабильность параметров будем понимать в вероятностном ключе, то есть представлять анализируемые параметры в качестве случайных величин. Эти параметры изменяются от импульса к импульсу. К основным параметрам импульса тормозного излучения относятся: интенсивность излучения; максимальная энергия в спектре; пространственное положение оси пучка. Необходимость учёта таких параметров отмечается в работах [10–14], посвящённых источникам импульсного тормозного (рентгеновского) излучения всех энергетических диапазонов и многочисленным направлениям их применения.

Рассмотрим фрагмент ОДК, который характеризуется двумя параметрами: массовой толщиной ρH ; эффективным атомным номером материала Z . Радиационно-чувствительные преобразователи (РЧП) радиометрических детекторов изготовлены из одного материала и имеют толщину h . Наибольшее распространение получили сцинтилляционные детекторы (СД). Пусть в процессе формирования каждой точки исходных радиографических изображений аналоговым путём интегрируется n импульсов, $n \geq 1$. Тогда с учётом темнового сигнала радиометрического детектора (сигнал при выключенном ИТИ) в соответствии с подходом из работы [3] аналоговый сигнал на его выходе в первом приближении пропорционален величине

$$J(\rho H, Z) = \sum_{i=1}^n \alpha_i I_i(\rho H, Z) + \sum_{i=1}^n I_{iD}. \quad (1.1)$$

В формуле (1) все случайные величины α_i , $I_i(\rho H, Z)$, I_{iD} , $i=1 \dots n$ являются взаимно независимыми и для их средних значений и дисперсий выполняются следующие условия

$$\begin{aligned} \overline{\alpha_i} &= 1, \quad \sigma^2 \alpha_i = \sigma^2 \alpha, \quad \overline{I_i(\rho H, Z)} = \overline{I(\rho H, Z)}, \\ \overline{I_{iD}} &= I_{iD}, \quad \sigma^2 I_i(\rho H, Z) = \sigma^2 I(\rho H, Z), \quad \sigma^2 I_{iD} = \sigma^2 I_{iD}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Отметим, что случайные величины α_i характеризует флуктуации не

только числа сбрасываемых электронов, но и флуктуации максимальной энергии в спектре и флуктуации геометрического положения оси пучка тормозного излучения и т.п. Случайные величины I_{iD} представляют собой энергетические эквиваленты темновых сигналов с детектора. Случайные величины $I_i(\rho H, Z)$, $i=1..n$ представляют собой энергию i -го импульса тормозного излучения, оставленную в РЧП детектора, с учётом ослабления излучения барьером с параметрами ρH и Z . Выражение для вычисления $I_i(\rho H, Z)$ имеет вид

$$I_i(\rho H, Z) = N_0 \int_0^{\overline{E_{\max}}} \overline{E_{ab}(E, h)} f(E, \overline{E_{\max}}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE \quad (1.3)$$

где N_0 – среднее число рентгеновских фотонов, пересекающих фронтальную поверхность детектора за длительность импульса в случае отсутствия ОК; $\overline{E_{ab}(E, h)}$ – среднее значение поглощённой энергии фотона с энергией E , испытавшего взаимодействие с чувствительным объёмом детектора; $\overline{E_{\max}}$ – среднее значение максимальной энергии тормозного излучения; $m(E, Z)$ – энергетическая зависимость массового коэффициента ослабления (МКО) фотонного излучения; $\varepsilon(E, h)$ – энергетическая зависимость эффективности регистрации (ЭР) фотонного излучения детектором толщиной РЧП h .

Дисперсия случайной величины $J(\rho H, Z)$ оценивается с помощью разложения (1.1) по малым приращениям

$$\sigma^2 J(\rho H, Z) = n \overline{I(\rho H, Z)}^2 \left(\delta^2 \alpha + \frac{\eta^2(\rho H, Z)}{N(\rho H, Z)} + \frac{\sigma^2 I_D}{I(\rho H, Z)^2} \right), \quad (1.4)$$

где η – коэффициент накопления флуктуаций поглощённой энергии [13–14];

$$\overline{N(\rho H, Z)} = N_0 \int_0^{\overline{E_{\max}}} f(E, \overline{E_{\max}}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE. \quad (1.5)$$

Квадрат коэффициента накопления флуктуаций поглощенной энергии $\eta^2(\rho H, Z)$ находится по формуле из [15]

$$\eta^2(\rho H, Z) = \frac{\int_0^{E_{\max}} \overline{E_{ab}^2(E)} f(E, \overline{E_{\max}}) e^{-m(E,Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\left(\int_0^{E_{\max}} \overline{E_{ab}(E)} f(E, \overline{E_{\max}}) e^{-m(E,Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE \right)^2}, \quad (1.6)$$

где $\overline{E_{ab}^2(E)}$ – среднее значение и среднее квадрата поглощенной в детекторе энергии [15].

Отметим, что вклад флуктуаций максимальной энергии рентгеновских фотонов в коэффициенты α_i зависит от параметров объекта. Вклад флуктуаций геометрического положения оси пучка тормозного излучения в общие флуктуации зависит от ρH и Z материалов ОК или его фрагментов может быть значимым, что обусловлено соответственным изменением геометрии прохождения информативного пучка тормозного излучения для конкретного радиометрического детектора.

Аналоговый сигнал поступает на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), с выхода которого снимается цифровой сигнал. Это преобразование обуславливает появление специфической систематической погрешности, взаимодействие которой с шумами изображения не поддается аналитическому описанию, но может быть исследовано методом имитационного моделирования. В настоящее время в ряде систем цифровой радиографии и ИДК применяются АЦП с разрядностью 24 bit, этого является достаточным для обеспечения современных потребительских запросов к ИДК с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов методом дуальных энергий.

В работе [9] проанализированы изменения статистических параметров радиометрических сигналов в высокоэнергетических ИДК на всех этапах обработки информации. Обработка информации начинается с предварительного этапа формирования цифровых радиографических изображений. Заканчивается она этапом раскрашивания откалиброванных по «чёрному» и по «белому» и линеаризованных цифровых радиографических

изображений на основе анализа параметров распознавания.

Остановимся на оценке дисперсий предварительно обработанных сигналов.

1.2 Оценка дисперсий сигналов после предварительной обработки

Калибровка по «чёрному» сводится к вычитанию темновых сигналов детекторов.

Калибровка по «белому» представляет собой нормировку откалиброванных по «чёрному» цифровых сигналов за объектом контроля на откалиброванные по «чёрному» цифровые сигналы по воздуху.

Линеаризация эквивалентна умножению натурального логарифма откалиброванного по «белому» сигнала на минус единицу. Полученный результат имеет строгое физическое толкование – толщина ОДК в длинах свободного пробега (ДСП).

В формализованном виде предварительные преобразования, приводящие к результирующему сигналу $y(\rho H, Z)$, описываются совокупностью выражений

$$\begin{aligned} y(\rho H, Z) &= -\ln R(\rho H, Z) = \ln \frac{J(\rho H, Z) - n\bar{I}_D}{J(0,0) - n\bar{I}_D} = \\ &= \ln \left(\overline{J(0,0) - n\bar{I}_D} \right) - \ln \left(J(\rho H, Z) - n\bar{I}_D \right). \end{aligned} \quad (1.7)$$

В формуле (1.7) $R(\rho H, Z)$ – сигнал без линеаризации, численно равный прозрачности объекта контроля для тормозного излучения.

Оценка дисперсии $y(\rho H, Z)$ выглядит следующим образом

$$\sigma^2 y(\rho H, Z) = \frac{\sigma^2 J(\rho H, Z) + \frac{n^2 \sigma^2 I_D}{k_D}}{(J(\rho H, Z) - n\bar{I}_D)^2} + \frac{\frac{\sigma^2 J(0,0)}{k} + \frac{n^2 \sigma^2 I_D}{k_D}}{(J(0,0) - n\bar{I}_D)^2}, \quad (1.8)$$

здесь k, k_D – количество точек в выборках для оценки средних значений сигналов для калибровки по воздуху и оценки средних значений темновых сигналов детекторов.

Совокупность выражений (1.1)–(1.8) позволяет аналитически рассчитать среднеквадратические отклонения сигналов σ_L и σ_H на входе в алгоритм распознавания для максимальных энергий $\bar{E}_{\max} = E_L$ и $\bar{E}_{\max} = E_H$ и использовать σ_L и σ_H для дальнейшей оценки среднеквадратических отклонений параметров распознавания материалов ОК и их фрагментов. Здесь и далее индекс L относится к «Low energy», а индекс H к «High energy».

1.3 Оценка среднеквадратических отклонений параметров распознавания материалов методом дуальных энергий

В работе [9] приведена совокупность математических соотношений, связывающая шумы в исходных радиографических изображениях МДЭ с шумами в изображениях ПР. Наиболее распространёнными подходами к распознаванию материалов на основе МДЭ являются идентификация по эффективному атомному номеру и способ линий уровней.

Кратко остановимся на указанных способах распознавания материалов ОК и их фрагментов для продолжения начального этапа алгоритма распознавания материалов ОК и их фрагментов, базирующегося на выражениях (1.1)–(1.8), до логического завершения.

1.3.1 Распознавание по эффективному атомному номеру

Существуют два описания уравнений связи параметров МДЭ и характеристик ослабления тормозного излучения. В первом описании экспериментально оцениваются коэффициенты ослабления тормозного излучения «Low energy» и «High energy». Система для нахождения параметров МДЭ A и B представляет собой систему линеаризованных интегральных параметрических уравнений с экспоненциальным ядром [9]

$$\begin{aligned}
& - \ln \frac{\int_0^{E_L} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_L) e^{-Aw_1(E) - Bw_2(E)} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_L} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_L) \varepsilon(E, h) dE} = y_L(\rho H, Z) \\
& - \ln \frac{\int_0^{E_H} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_H) e^{-Aw_1(E) - Bw_2(E)} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_H} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_H) \varepsilon(E, h) dE} = y_H(\rho H, Z).
\end{aligned} \tag{1.9}$$

Рассмотрим трансформацию обобщённых шумов для системы (1.9).

Правые части системы (1.9) являются случайными величинами, поэтому и параметры МДЭ также являются случайными величинами, причём эти величины зависят друг от друга. Оценки дисперсий $\sigma^2 A(\rho H, Z)$, $\sigma^2 B(\rho H, Z)$ и ковариации $\text{cov}(A, B)(\rho H, Z)$ находятся методом малых приращений [9]

$$\begin{aligned}
\sigma^2 A(\rho H, Z) &= \frac{g_{H2}^2 \sigma^2 y_L(\rho H, Z) + g_{L2}^2 \sigma^2 y_H(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}, \\
\sigma^2 B(\rho H, Z) &= \frac{g_{L1}^2 \sigma^2 y_H(\rho H, Z) + g_{H1}^2 \sigma^2 y_L(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)}, \\
\text{cov}(A, B)(\rho H, Z) &= \frac{-g_{H2} g_{H1} \sigma^2 y_L(\rho H, Z) - g_{L2} g_{L1} \sigma^2 y_H(\rho H, Z)}{G^2(\rho H, Z)},
\end{aligned} \tag{1.10}$$

здесь $G(\rho H, Z) = g_{L1}(\rho H, Z) g_{H2}(\rho H, Z) - g_{L2}(\rho H, Z) g_{H1}(\rho H, Z)$,

$$\begin{aligned}
g_{Lj} = g_{Lj}(\rho H, Z) &= \frac{\int_0^{E_L} w_j(E) \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_L) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_L} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_L) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}, \\
g_{Hj} = g_{Hj}(\rho H, Z) &= \frac{\int_0^{E_H} w_j(E) \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_H) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_H} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_H) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}.
\end{aligned} \tag{1.11}$$

Для рассматриваемого случая параметром распознавания является эффективный атомный номер Z , который для высокоэнергетической реализации МДЭ вычисляется по формуле

$$Z = \frac{B}{A}. \quad (1.12)$$

Выражение для оценки дисперсии Z имеет вид

$$\sigma^2 Z = \frac{B^2}{A^2} \left(\frac{\sigma^2 B}{B^2} + \frac{\sigma^2 A}{A^2} - \frac{2\text{cov}(A, B)}{AB} \right). \quad (1.13)$$

1.3.2 Распознавание по методу линий уровней

Параметром распознавания материалов методом линий уровней Q является отношение [9]

$$Q = \frac{y_H}{y_L}. \quad (1.14)$$

Дисперсия параметра распознавания Q оценивается по формуле

$$\sigma^2 Q = Q^2 \left(\frac{\sigma^2 y_H}{y_H^2} + \frac{\sigma^2 y_L}{y_L^2} \right). \quad (1.15)$$

Совокупности выражений (1.1)–(1.13) и (1.1)–(1.9), (1.14), (1.15) представляют собой математические модели системы формирования и обработки информации в инспекционных досмотровых комплексах с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий по эффективному атомному номеру и методом линий уровней. Усовершенствование математических моделей ИДК с функцией распознавания методом дуальных энергий [9] сводится к учёту флуктуаций параметров импульсов тормозного излучения.

Усовершенствованные математические модели позволяют оценить вклад различных факторов в статистическую погрешность параметров распознавания материалов, что делает их незаменимыми на стадии проектирования соответствующих инспекционных досмотровых комплексов.

Достоинством разработанных математических моделей является простота их адаптации в экспериментальные исследования, возможность отслеживания трансформации шумов на всех этапах обработки информации,

начиная с калибровок первичных радиографических изображений и заканчивая изображениями параметров распознавания. Ниже будут проиллюстрированы эти положения.

Остановимся подробнее на связи основных параметров импульсов тормозного излучения с параметрами случайной величины α .

2 Флуктуации параметров импульсов тормозного излучения

2.1 Флуктуации мощности дозы излучения

Со случайной величиной α связано изменение общей энергии фотонов E_p в одном импульсе. Логично предположить, что указанная энергия определяется количеством ускоренных электронов n_e и их энергией E_e . Отметим, энергия E_e должна совпадать с E_{\max} .

С учётом сказанного случайная величина α в общем случае определяется формулой

$$\alpha = \frac{n_e E_e}{\overline{n_e E_e}}. \quad (2.1)$$

Анализ выражения (2.1) позволяет сделать заключение об определённой сложности в описании связи дисперсии случайной величины α и числа электронов n_e , также рассматриваемого в качестве случайной величины. Для источника тормозного излучения с высокой стабильностью энергии ускоренных электронов выполняется соотношение

$$\sigma^2 \alpha \approx \delta^2 n_e. \quad (2.2)$$

Отметим, что более корректен совместный учёт флуктуаций числа сбрасываемых на мишень электронов и их энергии, но для оценочных результатов достаточно выражения (2.2)

2.2 Флуктуации максимальной энергии тормозного излучения

Опишем некоторую случайную величину β , связанную со случайной величиной E_{\max} . Известно, что мощность дозы тормозного излучения P зависит от максимальной энергии E_{\max} , и соответствующая аппроксимация имеет степенной вид [16–18]

$$P = c E_{\max}^\lambda, \quad (2.3)$$

где c – параметр, который не зависит от максимальной энергии тормозного излучения; λ – показатель степени. Параметр аппроксимации λ зависит от диапазона энергий тормозного излучения. Для максимальных энергий рентгеновского излучения $E_{\max} \leq 100$ кэВ $\lambda \approx 2$, для интересующего нас диапазона $\lambda \approx 3$ [16–18].

Современные источники высокоэнергетического тормозного излучения укомплектованы специализированным цифровым монитором, позволяющим измерять мощность дозы излучения с высокой точностью, поэтому значение параметра λ может быть уточнено в процессе экспериментальных исследований.

Связь случайной величины β со случайной величиной E_{\max} описывается выражением, аналогичным формулам из работ [3, 19],

$$\beta = \frac{E_{\max}^{\lambda} \exp(-m_{\text{int}}(E_{\max}, \rho H) \rho H)}{\bar{E}_{\max}^{\lambda} \exp(-m_{\text{int}}(\bar{E}_{\max}, \rho H) \rho H)}, \quad (2.4)$$

здесь m_{int} – «приборный» интегральный массовый коэффициент ослабления тормозного излучения.

Определение «приборный» означает, что при оценке интегрального массового коэффициента ослабления тормозного излучения учитывается материал, размеры чувствительного объёма радиометрического детектора и разрядность АЦП.

Для оценки дисперсии случайной величины β используется традиционный метод разложения функции (2.4) по малому приращению. По аналогии с [3, 19] формула для вычисления $\sigma^2 \beta$ имеет вид

$$\sigma^2 \beta = \left[\lambda - \rho H \bar{E}_{\max} \frac{\partial m_{\text{int}}(\bar{E}_{\max}, \rho H)}{\partial \bar{E}_{\max}} \right]^2 \frac{\sigma^2 E_{\max}}{\bar{E}_{\max}^2}. \quad (2.5)$$

На рис. 2.1 приведены зависимости $m_{\text{int}}(E_{\max})$ для высокоэнергетического тормозного излучения и массовых толщин ОК из диапазона от 10 до 80 см²/г.

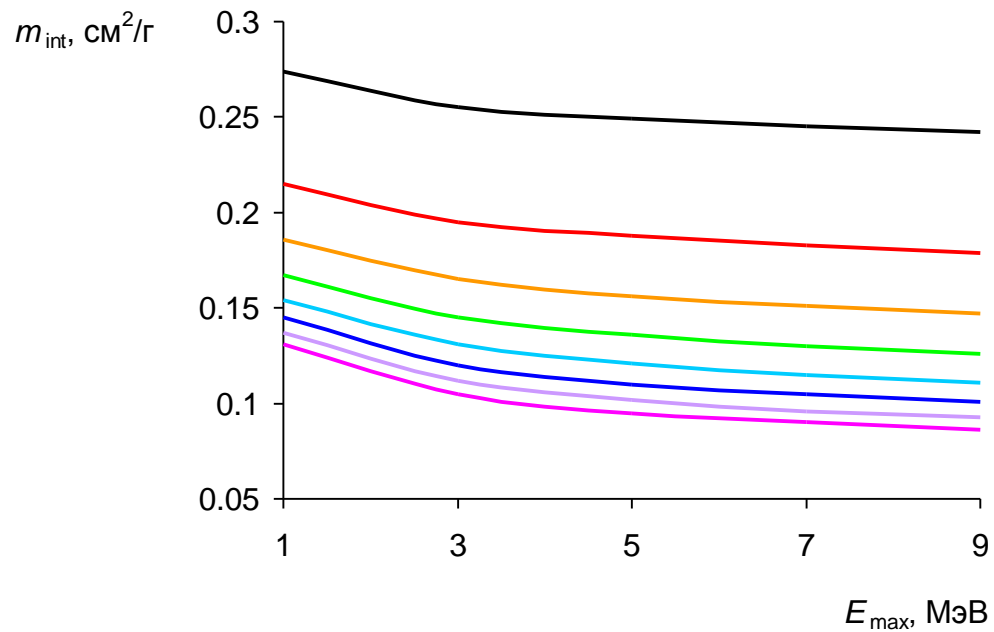


Рисунок 2.1 – Зависимости $m_{\text{int}}(E_{\text{max}})$:
 — $\rho H=10$ г/см²; — $\rho H=20$ г/см²; — $\rho H=30$ г/см²; — $\rho H=40$ г/см²;
 — $\rho H=50$ г/см²; — $\rho H=60$ г/см²; — $\rho H=70$ г/см²; — $\rho H=80$ г/см²

Все зависимости, приведённые на рис. 2.1 являются убывающими, причём скорость убывания уменьшается с ростом E_{max} . Предложенное в работе [9, 19] выражение для аппроксимации интегрального линейного коэффициента ослабления тормозного излучения от максимальной энергии $m_{\text{int}}(E_{\text{max}})$ может быть обобщено введением дополнительного параметра τ

$$m_{\text{int}}(E_{\text{max}}, \rho H) = c_1 E_{\text{max}}^\tau + c_2, \quad (2.6)$$

где коэффициенты c_1 , c_2 , τ зависят от материала и толщины ОК. Отметим, что указанная аппроксимация далеко не единственная. Зависимость $m_{\text{int}}(E_{\text{max}})$ может быть получена и экспериментальным путём.

После подстановки (2.6) в выражение (2.5) получим итоговую формулу для вычисления $\sigma^2\beta$

$$\sigma^2\beta = \left(\lambda + \rho H c_1 \overline{E_{\text{max}}^\tau} \right)^2 \delta^2 E_{\text{max}}. \quad (2.7)$$

Выражение (2.7) может быть использовано как в прямой задаче проектирования и эксплуатации ИДК, так и в обратной задаче. Это означает, что, с одной стороны, по известному значению $\delta^2 E_{\text{max}}$ определяется величина $\sigma^2\beta$, используемая для оценки парциального вклада компонент шума в

качество распознавания материалов. С другой стороны, величина $\sigma^2\beta$, определённая экспериментальным путём, возможно позволит вычислить $\delta^2 E_{\max}$, что является необходимым для мониторинга технического состояния импульсного источника тормозного излучения. Коэффициенты λ , τ и c_1 оцениваются на стадии предварительных экспериментальных исследований источника тормозного излучения.

2.3 Флуктуации геометрического положения оси пучка тормозного излучения

Флуктуации геометрического положения оси пучка тормозного излучения становятся значимыми в случае существенной анизотропии углового распределения излучения. Флуктуации центра излучающей поверхности (фокусного пятна) также приводят к искажениям углового распределения тормозного излучения и вносят свой вклад во флуктуации геометрического положения оси пучка тормозного излучения. Флуктуации геометрического положения оси пучка отмечаются для источников тормозного излучения всех диапазонов [19–21]. Угловое распределение является одной из базовых характеристик источника тормозного излучения, поэтому её определяют методами натурального и вычислительного эксперимента [22–25]. Для описания углового распределения интенсивности тормозного излучения в импульсе используются различные унимодальные функции [19, 25]. В работах [3, 19] использована экспоненциальная аппроксимация

$$\frac{I(\varphi)}{I(\varphi=0)} = c_\varphi e^{-c_\varphi \varphi}, \quad (2.8)$$

здесь c_φ – параметр аппроксимации.

Введём случайную величину γ , характеризующую флуктуации геометрического положения оси пучка тормозного излучения. Введение

понятия и формула для вычисления случайной величины γ основана на выражении (2.8) и имеет вид

$$\gamma = c_{\varphi} e^{-c_{\varphi} \varphi_0}, \quad (2.9)$$

где φ_0 – угол между средним и текущим положением оси пучка тормозного излучения.

В геометрических схемах ИДК расстояние от источника излучения в сто и более раз превышает эффективную апертуру детектора, поэтому выражение для оценки $\sigma^2 \varphi_0$ может быть найдено методом разложения по малым приращениям

$$\sigma^2 \gamma = c_{\varphi}^2 \sigma^2 \varphi_0. \quad (2.10)$$

где φ_0 – угол между средним положением пучка тормозного излучения и текущим положением оси, то есть для конкретного импульса тормозного излучения.

При наличии экспериментального описания углового распределения интенсивности тормозного излучения в импульсе выражение (2.8) в совокупности с математическими моделями предыдущего раздела позволяет легко учесть вклад флуктуаций геометрического положения оси пучка в качество распознавания материалов.

Помимо этого, экспериментальное измерение флуктуаций γ является основой для оценки среднеквадратического отклонения угла между средним и текущим положением оси пучка тормозного излучения. Пусть пространственные флуктуации оси пучка тормозного излучения приводят к флуктуации интенсивности от импульса к импульсу в диапазоне от 1 до 5 % [19], тогда интервал изменения среднеквадратического отклонения угла φ_0 описывается неравенством

$$\frac{-\ln 0,99}{c_{\varphi}} \leq \sigma \varphi_0 \leq \frac{-\ln 0,95}{c_{\varphi}}. \quad (2.11)$$

2.4 Компенсация флуктуаций параметров импульсов тормозного излучения

При использовании источников импульсного тормозного излучения для частичного устранения флуктуаций параметров импульсов в различных реализациях систем цифровой радиографии, компьютерной томографии и инспекционного досмотрового контроля в систему детектирования вводят дополнительный радиометрический детектор. Все откалиброванные по «чёрному» измеренные цифровые сигналы нормируются на откалиброванный по «чёрному» цифровой сигнал с опорного канала [1, 3, 26–29]. Учитывая алгоритм обработки информации, такую схему называют схемой отношения.

Заметим, что с большей эффективностью компенсируются флуктуации числа сбрасываемых на мишень электронов, с меньшей степенью компенсируются флуктуации максимальной энергии тормозного излучения и геометрического положения оси пучка. Наилучшая компенсация достигается в том случае, если измерительные детекторы и опорный каналы имеют один и тот же телесный угол. Указанное требование практически невозможно реализовать для систем детектирования ИДК, так как они содержат большое число детекторов.

Ниже оценим остаточный вклад флуктуаций максимальной энергии и геометрического положения пучка в сигнал на выходе схемы отношения.

Сигнал на выходе схемы отношения определяется выражением

$$y = \frac{\beta_{ms} I_{ms}}{\beta_{rs} I_{rs}}, \quad (2.12)$$

здесь ms соответствует измерительному сигналу, а rs – опорному сигналу.

В ИДК в качестве опорного канала используют один или несколько детекторов линейки радиометрических детекторов. Единственным отличием опорных и измерительных детекторов является то, что опорные каналы

системы детектирования расположены вдали от зоны тени объекта досмотрового контроля. Указанное отличие для опорных детекторов эквивалентно приближительному равенству $\rho H \approx 0$ в выражении (2.4), поэтому

$$\beta_{rs} = \frac{E_{\max}^{\lambda}}{\bar{E}_{\max}^{\lambda}}. \quad (2.13)$$

Для вычисления дисперсии y на первом этапе запишем выражение (2.12) с учётом формул (2.4) и (2.13) следующим образом

$$y = \left(\frac{\exp(-m_{\text{int}}(E_{\max}, \rho H) \rho H)}{\exp(-m_{\text{int}}(\bar{E}_{\max}, \rho H) \rho H)} \right) \left(\frac{I_{\text{ms}}}{I_{\text{rs}}} \right). \quad (2.14)$$

С учётом независимости мультипликативных составляющих выражение для вычисления $\sigma^2 y$ имеет вид

$$\sigma^2 y = \left(\frac{I_{\text{ms}}}{I_{\text{rs}}} \right)^2 \sigma^2 \left(\frac{\exp(-m_{\text{int}}(E_{\max}, \rho H) \rho H)}{\exp(-m_{\text{int}}(\bar{E}_{\max}, \rho H) \rho H)} \right) + \sigma^2 \left(\frac{I_{\text{ms}}}{I_{\text{rs}}} \right). \quad (2.15)$$

После необходимых преобразований получим выражение, связывающее погрешности $\delta^2 y$ и $\delta^2 E_{\max}$

$$\delta^2 y = \left(\frac{\rho H c_1}{E_{\max}} \right)^2 \delta^2 E_{\max} + \delta^2 I_{\text{ms}} + \delta^2 I_{\text{rs}}. \quad (2.16)$$

Выражение (2.16) в совокупности с математическими моделями из первого раздела позволяет проанализировать эффективность применения опорных каналов для компенсации флуктуаций параметров импульсов тормозного излучения в ИДК с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов методом дуальных энергий.

На основании совокупности выражений, приведённых в разделе, можно предложить ряд способов для оценки флуктуаций параметров импульсов тормозного излучения.

3 Основы измерения флуктуаций параметров тормозного излучения

Приведённые выше результаты исследований связывают флуктуации параметров импульсов тормозного излучения со статистическими погрешностями оценки параметров распознавания методом дуальных энергий. Ожидается, что в процессе эксплуатации инспекционных досмотровых комплексов на основе импульсных источников высокоэнергетического тормозного излучения происходят изменения параметров пучка, в том числе и уровней флуктуаций параметров пучка от импульса к импульсу: мощности дозы; максимальной энергии; положения геометрической оси пучка. В работе [19] предложено несколько подходов к измерению относительных среднеквадратических отклонений параметров пучка тормозного излучения. Эти подходы основаны на взаимных связях среднеквадратических погрешностей измеряемых физических величин и среднеквадратических отклонений параметров пучка. Соответствующие формулы для описания указанных связей описаны выше. Модифицированные подходы из работы [19] частично могут быть реализованы и в ИДК.

3.1 Измерение флуктуаций мощности дозы излучения в импульсе

Без учёта темновых сигналов детекторов можно считать, что сигнал с радиометрического детектора J равен произведению двух независимых случайных величин α и I

$$J = \alpha I . \quad (3.1)$$

Случайная величина α характеризует флуктуации мощности излучения от импульса к импульсу, $\bar{\alpha} = 1$. Случайная величина I определяется взаимодействием рентгеновских фотонов с материалами ОК и чувствительными объёмами детекторов.

Формула связи относительного среднеквадратического отклонения

сигнала J с относительными среднеквадратическими отклонениями случайных величин α и I записывается аналогично (1.4)

$$\delta^2\alpha + \delta^2I = \delta^2J. \quad (3.2)$$

В выражении (3.2) два неизвестных – $\delta^2\alpha$ и δ^2I . Анализируемая случайная величина α , поэтому подвергаться вариации может только случайная величина I . В процессе измерений $\delta^2\alpha$ должны участвовать не менее двух детекторов, сигналы с которых должны сниматься в одинаковые моменты времени. Сигналы с детекторов, как случайные величины, должны отличаться по уровням δ^2J . Указанное отличие достигается на основе использования основных физических закономерностей ослабления тормозного излучения и сводится к следующим способам [19]:

1 – измерение δ^2J для сигналов с двух эквивалентных детекторов, удаленных от источника излучения на различные расстояния;

2 – измерение δ^2J для двух детекторов с различной площадью чувствительного элемента (площадью апертур);

3 – измерение δ^2J для двух эквивалентных детекторов при разной толщине фильтра предварительной фильтрации излучения.

Способы 1 и 2 обусловлены геометрическим ослаблением фотонного излучения (закон обратных квадратов). Способ 3 основан на законе ослабления фотонного излучения фильтром.

Выше отмечено, что угловые распределения излучения высокоэнергетических источников тормозного излучения являются анизотропными и вытянутыми вперед, поэтому детекторы, близкие к оси пучка, и периферийные детекторы имеют разные уровни δ^2J , следовательно, указанные группы детекторов могут быть использованы для оценки $\delta^2\alpha$ четвертым способом. Способ 4 является наиболее естественным и органичным для системы детектирования ИДК.

Введём параметр $t = \delta^2I_1 / \delta^2I_2$. Физическое содержание параметра t зависит от способа измерения $\delta^2\alpha$. Если значение параметра t для конкретной реализации способа оценки $\delta^2\alpha$ существенно отличается от 1, то это является

условием применимости рассматриваемой реализации. Для любого способа измерения $\delta^2\alpha$ вычислительная формула имеет вид

$$\delta^2\alpha = \frac{\delta^2 J_1 - \delta^2 J_2 t}{1 - t}, \quad (3.3)$$

где $\delta J_1, \delta J_2$ – относительные среднеквадратические отклонения сигналов для двух измерений.

Выражения, иллюстрирующие физический смысл параметров t_1, t_2, t_3, t_4 , здесь индекс ассоциирован с соответствующим способом оценки $\delta^2\alpha$, выглядят следующим образом

$$t_1 = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2; t_2 = \frac{S_2}{S_1}; t_3 = \frac{e^{-m(\rho H_2)\rho H_2}}{e^{-m(\rho H_1)\rho H_1}}, t_4 = \frac{I(\varphi_2)}{I(\varphi_1)}, \quad (3.4)$$

где R_1, R_2 – расстояния от источника излучения до радиометрических детекторов; S_1, S_2 – площади апертур детекторов; $\rho H_1, \rho H_2$ – массовые толщины ослабляющих фильтров; $m_{\text{int}}(\rho H)$ – интегральный линейный коэффициент ослабления излучения за фильтром массовой толщиной ρH ; φ_1, φ_2 – углы между осью пучка излучения и направлением на детекторы; $I(\varphi)$ – угловое распределение излучения.

Применительно к ИДК наиболее применимыми являются способы 3 и 4, они естественным образом могут быть интегрированы в систему отслеживания технического состояния источника излучения. Способ 3 реализуется на стадии калибровочных измерений при просвечивании тестовых объектов, а способ 4 – на стадии калибровки по белому. При вычислениях $\delta^2\alpha$ способами 3, 4 могут быть задействованы выборки большого объёма. Это подтверждает возможность оценки $\delta^2\alpha$ с высокой точностью. Очевидно, что при значениях $t=0$ и $t=1$ невозможно получить какую-либо оценку $\delta^2\alpha$.

Обоснуем рекомендации относительно выбора параметра t . Покажем, что параметр t может быть найден из условия минимума погрешности измерения величины $\delta^2\alpha$. Выражение для оценки дисперсии квадрата относительной погрешности сигнала J выводится из формул, приведённых в

справочнике [30], и для большого объема выборки n можно считать, что

$$\sigma^2(\delta^2 J) \approx \frac{2\delta^4 J(1 + 2\sigma^2 J)}{n-1}. \quad (3.5)$$

После подстановки (3.2) в (3.5) получим

$$\sigma^2(\delta^2 J) = \frac{2(\delta^2 \alpha + \delta^2 I)(1 + 2(\delta^2 \alpha + \delta^2 I))}{n-1}. \quad (3.6)$$

Дисперсия измеряемой величины $\delta^2 \alpha$ находится из (3.3) с использованием разложения по малым приращениям

$$\sigma^2(\delta^2 \alpha) = \frac{\sigma^2(\delta^2 J_1) + \sigma^2(\delta^2 J_2)t^2}{(1-t)^2}. \quad (3.7)$$

С точностью до постоянного множителя зависимость $\sigma^2 \delta^2 \alpha$ от параметра t описывается выражением

$$f(t) = \frac{1 + \frac{\left(\frac{a^2}{t} + \delta^2 \alpha\right)^2 \left[1 + 2\left(\frac{a^2}{t} + \delta^2 \alpha\right)\right] t^2}{(a^2 + \delta^2 \alpha)^2 (1 + 2(a^2 + \delta^2 \alpha))}}{(1-t)^2}, \quad (3.8)$$

где $a = \delta I_1$. Для значений $t=0$ и $t=1$ значение функции f равно бесконечности, поэтому существует значение t_{\min} , $0 < t_{\min} < 1$, для которого значение функции $f(t)$ минимально. Функция $f(t)$ является двухпараметрической, поэтому t_{\min} зависит от $\delta \alpha$ и δI_1 .

На рисунке 3.1 приведены типичные зависимости $f(t)$ для различных уровней $\delta \alpha$ и δI_1 . Из анализа данных, приведённых на рис. 3.1 можно сделать вывод о пологости функции $f(t)$ вблизи минимума, что позволяет варьировать значение параметра t в достаточно широких пределах. Значение параметра t из интервала от 0,3 до 0,5 реализуемо на практике для любого из способов оценки $\delta^2 \alpha$.

Помимо способов, обсуждённых выше, может быть использован способ [19], основанный на статистической связи сигналов с любых двух радиометрических детекторов. Очевидно, что сигналы с двух детекторов J_1 и J_2 описываются выражением (3.1)

$$J_1 = \alpha I_1 \quad J_2 = \alpha I_2 \quad (3.9)$$

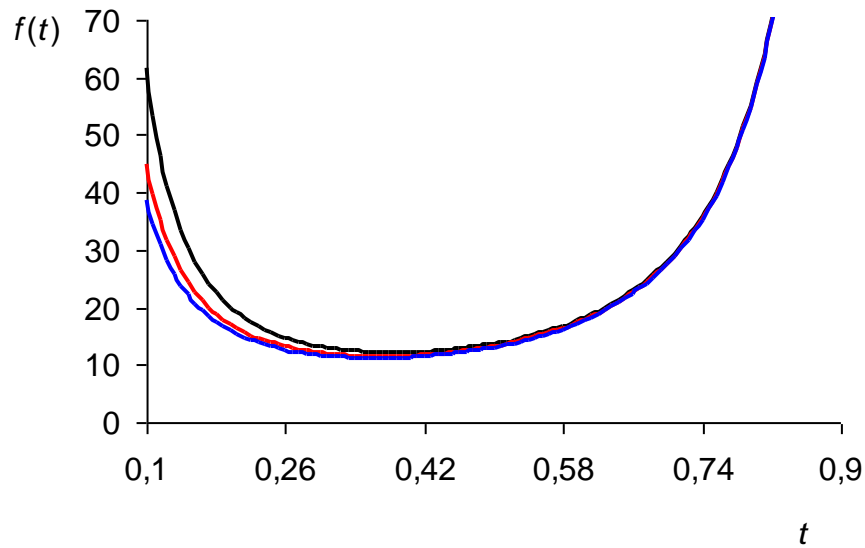


Рисунок 3.1 – Типичные зависимости $f(t)$:
 --- $a=0,2, \delta\alpha=0,2$; — $a=0,1, \delta\alpha=0,1$; — $a=0,01, \delta\alpha=0,01$

С учётом независимости случайных величин I_1 и I_2 формула для вычисления коэффициента ковариации $\text{cov}(J_1, J_2)$ будет иметь вид

$$\text{cov}(J_1, J_2) = \delta^2 \alpha \overline{J_1} \overline{J_2} \quad (3.10)$$

Способ оценки $\delta\alpha$, основанный на выражении (3.10), исключительно прост в реализации и позволяет отслеживать изменение этого параметра в процессе эксплуатации ИДК. Помимо этого, одновременность оценок $\delta\alpha$ для всей совокупности пар радиометрических детекторов системы детектирования ИДК при близости оценок повышает степень доверия к измерениям, существенное же расхождение оценок для некоторых пар детекторов является, вероятнее всего, диагностическим признаком, побуждающим к оценке технического состояния системы детектирования.

Процедура сопоставления нескольких, приемлемых для системы детектирования ИДК, способов оценки флуктуаций мощности дозы в одном импульсе не влечёт за собой ни материальных, ни временных затрат, поэтому может быть встроена в систему обработки информации в качестве блока диагностики технического состояния излучателя и системы детектирования.

Следует отметить, что указанные оценки должны осуществляться для импульсов «low energy» и «high energy». Помимо всего прочего анализ подобной информации позволит более обоснованно подойти к формированию пакетов импульсов с корректным соотношением импульсов «low energy» и «high energy».

3.2 Измерение нестабильности максимальной энергии

Для определения уровня нестабильности максимальной энергии E_{\max} , который характеризуется $\delta^2 E_{\max}$ необходимо устранить или свести к минимуму флуктуации числа сбрасываемых на мишень электронов. Это достигается применением «схемы отношения», когда измеряемая величина есть отношение показаний двух независимых детекторов (измерительного и опорного) (2.12). Возможность измерения $\delta^2 E_{\max}$ основана на нелинейности зависимости $m_{\text{int}}(E_{\max})$.

В разделе 2.4 рассмотрены вопросы, связанные с компенсацией флуктуаций параметров пучка тормозного излучения. Приводятся формулы, позволяющие связать погрешности измеренных сигналов с флуктуациями максимальной энергии. Ниже рассмотрим нюансы подходов к оценке $\delta^2 E_{\max}$.

Погрешность измерения результирующего сигнала

$$\delta^2 y = \delta^2 \left(\frac{I_{\text{ms}}}{I_{\text{rs}}} \right) + \delta^2 \left(\frac{\beta_{\text{ms}}}{\beta_{\text{rs}}} \right) \quad (3.11)$$

Отметим, что в практическом применении систем цифровой радиографии и компьютерной томографии представляют интерес, прежде всего, не флуктуации E_{\max} , а значение $\delta^2(\beta_{\text{ms}}/\beta_{\text{rs}})$, характеризующее остаточные уровни флуктуаций параметров тормозного излучения от импульса к импульсу.

Уравнение (3.11) является основой оценки $\delta^2(\beta_{\text{ms}}/\beta_{\text{rs}})$, для нахождения которой могут быть использованы способы, аналогичные приведённым в предыдущем разделе. Первые четыре способа подразумевают наличие

отличий по $\delta^2(I_{ms}/I_{rs})$ для пары радиометрических детекторов. Наиболее применим в практическом использовании способ, базирующийся на вычислении коэффициентов ковариации между парами сигналов y_1 и y_2 для всей совокупности радиометрических детекторов

$$\text{cov}(y_1, y_2) = \delta^2 \left(\frac{\beta_{ms}}{\beta_{rs}} \right) \overline{\left(\frac{I_{ms}}{I_{rs}} \right)^2}. \quad (3.12)$$

Связь $\delta^2(\beta_{ms}/\beta_{rs})$ и $\delta^2 E_{\max}$ описывается выражением

$$\delta^2 \left(\frac{\beta_{ms}}{\beta_{rs}} \right) \overline{\left(\frac{I_{ms}}{I_{rs}} \right)^2} = \left(\rho H c_1 \overline{E_{\max}^\tau} \right)^2 \delta^2 E_{\max} \overline{\left(\frac{I_{ms}}{I_{rs}} \right)^2} = \text{cov}(y_1, y_2). \quad (3.13)$$

Правое равенство выражения (3.13) является основой определения $\delta^2 E_{\max}$ в инспекционных досмотровых комплексах и предназначено для оценки технического состояния источника высокоэнергетического источника тормозного излучения по информативному параметру – нестабильности максимальной энергии.

Для корректного использования выражения (3.13) на практике необходимо сделать два важных замечания.

Замечание 1. В основе выражения (3.13) лежит обобщённая гиперболическая аппроксимация интегрального массового коэффициента ослабления тормозного излучения от максимальной энергии. Возможная трансформация упомянутой аппроксимации не изменит принципиального подхода к оценке флуктуаций $\delta^2 E_{\max}$.

Замечание 2. Из анализа выражения (3.13) можно сделать вывод о существовании значения массовой толщины ОК, при которой погрешность оценки $\delta^2 E_{\max}$ минимальна. Этот вывод естественным образом вытекает из невозможности оценки анализируемой величины для значений ρH , близких к нулю и бесконечности. В первом случае невозможность обусловлена делением на ноль, а во втором – невозможностью соблюдения принцип технической реализуемости. Напомним, что принцип технической реализуемости сводится к решению задачи измерения в заданное время с заданной точностью.

3.3 Измерение нестабильности положения геометрической оси пучка

Измерения флуктуаций пространственного положения геометрической оси пучка основываются на неравномерности углового распределения тормозного излучения. Это означает, для источников излучения, угловое распределение которых близко к изотропному распределению, оценить анализируемые флуктуации нет возможности, впрочем, как и необходимости.

Инспекционные досмотровые комплексы, как правило, используют в качестве систем детектирования линейки радиометрических детекторов, поэтому будем рассматривать анализируемую задачу с учётом этого обстоятельства. Пусть угловое распределение высокоэнергетического тормозного излучения описывается функцией $f(\varphi)$. Будем считать, что при измерении сигналов по «схеме отношения» без объекта контроля вклад нестабильности числа сбрасываемых электронов и максимальной энергии E_{\max} в шумы пренебрежимо мал. Такое допущение справедливо, если все чувствительные объёмы детекторов имеют близкие размеры и достаточно точно ориентированы на источник излучения. В этих условиях сигнал y может быть представлен в виде, аналогичном (2.12)

$$y = \frac{\gamma_{ms} I_{ms}}{\gamma_{rs} I_{rs}}, \quad (3.14)$$

здесь индекс ms соответствует измерительному сигналу, а rs – опорному сигналу; соответствующие случайные величины γ_{ms} и γ_{rs} характеризуют флуктуации положения геометрической оси пучка тормозного излучения и их средние значения равны единице.

Замечание 3. Аналогичность выражений (2.12) и (3.14) для анализа принципиально различных физических процессов обуславливает сложность в экспериментальном разделении этих процессов.

Пусть для опорного и измерительных детекторов углы между осями симметрии измерительного и опорного детекторов и средним положением оси пучка равны φ_{rs} и φ_{ms} соответственно, тогда случайные функции γ_{ms} и γ_{rs} описывается формулами

$$\gamma_{ms} = \frac{f(\varphi_{ms} - \varphi_0)}{f(\varphi_{ms})}, \gamma_{rs} = \frac{f(\varphi_{rs} - \varphi_0)}{f(\varphi_{rs})}, \quad (3.15)$$

где φ_0 – отклонение оси пучка от среднего положения, $\overline{\varphi_0} = 0$.

Формула для оценки погрешности Y выводится из выражения (14) и имеет вид, аналогичный формуле (3.11),

$$\delta^2 y = \delta^2 \left(\frac{I_{ms}}{I_{rs}} \right) + \delta^2 \left(\frac{\gamma_{ms}}{\gamma_{rs}} \right). \quad (3.16)$$

Очевидно, что выражения (3.15) и (3.16) выведены в предположении малости значений телесных углов, определяемых эффективными апертурами измерительного и опорного детекторов. Для вычисления $\delta^2(\gamma_{ms}/\gamma_{rs})$ пригоден любой из четырёх способов измерения флуктуаций мощности дозы для измерения. Величина $\delta^2(\gamma_{ms}/\gamma_{rs})$ связана с $\sigma^2\varphi_0$ формулой

$$\sigma^2 \left(\frac{\gamma_{ms}}{\gamma_{rs}} \right) = \sigma^2(\varphi_0) \left[\left(\frac{\partial f(\varphi_{ms} - \varphi_0)}{\partial \varphi_0 f(\varphi_{ms})} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(\varphi_{rs} - \varphi_0)}{\partial \varphi_0 f(\varphi_{rs})} \right)^2 \right]. \quad (3.17)$$

Для оценки $\sigma^2\varphi_0$ наиболее естественным представляется способ, который основан на анализе связи случайных величин γ_{ms}/γ_{rs} для разных измерительных детекторов. Связь случайных величин γ_1/γ_{rs} и γ_2/γ_{rs} характеризует ковариация

$$\text{cov} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_{rs}}, \frac{\gamma_2}{\gamma_{rs}} \right) = \sigma^2\varphi_0 \prod_{i=1}^2 \left[\left(\frac{\partial f(\varphi_i - \varphi_0)}{\partial \varphi_0 f(\varphi_i)} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(\varphi_{rs} - \varphi_0)}{\partial \varphi_0 f(\varphi_{rs})} \right)^2 \right]. \quad (3.18)$$

Для некоторых высокоэнергетических источников тормозного излучения данные по функциям $f(\varphi)$ имеются в научной литературе [16, 20]. Угловые распределения могут быть оценены экспериментально.

Замечание 4. Подход к измерению стабильности положения геометрической оси пучка тормозного излучения, изложенный выше, не учитывает двухмерности функции f . Этот фактор может быть учтён в том случае, если схема системы детектирования дополняется несколькими каналами, отнесёнными в пространстве от линейки детекторов и друг от друга.

4 Особенности экспериментального исследования трансформации шумов в методе дуальных энергий

4.1 Подходы к экспериментальному исследованию темновых сигналов радиометрических детекторов

На первом этапе экспериментально анализируются темновые сигналы всех детекторов (каналов регистрации) тормозного излучения, то есть исследуются случайные величины I_D . В высокоэнергетических инспекционных досмотровых комплексах применяются линейки радиометрических детекторов, как правило, разделённые на блоки, которые геометрически ориентированы на центр излучающего пятна источника излучения. Случайные величины характеризуются одной из мер положения, в качестве которой обычно используется среднее значение $\overline{I_D}$, и одной из мер рассеяния, например, среднеквадратическим отклонением σI_D . Наиболее полной характеристикой любой случайной величины ξ , определяемой на стадии эксперимента, является её выборочная плотность распределения $f_\xi(x)$.

Исследование случайных величин I_D на стадии сборки систем детектирования ИДК позволяет отобрать радиометрические детекторы по критерию однородности по одному или нескольким параметрам анализируемых случайных величин по блокам детекторов или по всей системе детектирования в целом. Наиболее рационально сравнивать радиометрические детекторы по выборочной плотности распределения сигналов с радиометрических детекторов с выключенным источником тормозного излучения. Естественно также требовать независимости случайных величин I_D для любых пар радиометрических детекторов.

Анализ случайных величин I_D в процессе эксплуатации ИДК позволит своевременно обнаружить искажение информации детектором или группой детекторов. При обработке информации такие детекторы будут помечены символом «bad» и их показания будут исключены из процедур визуализации

радиографических изображений и распознавания материалов ОК. Превышение количества «bad» детекторов некоторого значения или группировка нескольких таких детекторов в одном или нескольких блоках обуславливает необходимость ремонта системы детектирования ИДК.

В дополнение к сказанному выше можно сделать следующий вывод. Предварительное экспериментальное исследование темновых сигналов радиометрических детекторов по выборкам с большими объёмами позволят сформулировать рекомендации по выбору минимального объёма выборки для минимизации погрешности калибровки по «чёрному».

4.2 Оценка трансформации шумов на этапе калибровки по «белому»

Второй этап анализа трансформации радиометрических сигналов связан с исследованием совокупности откалиброванных по «чёрному» зарегистрированных детекторами сигналов. На этом этапе анализируемой случайной величиной является энергия, оставленная в радиометрическом детекторе, одним импульсом тормозного излучения.

Отметим, что в процесс анализа может быть вовлечены последовательности одиночных импульсов и группы последовательных импульсов тормозного излучения. Единственным условием в этой ситуации является неизменность количества импульсов в группе.

В формализованном виде исследуемыми случайными величинами второго этапа являются $I_0 = J(0,0) - \overline{I_D}$. Целью исследований в целом является не только анализ последовательной трансформации шумов, но и оценка характеристик основных компонентов ИДК. В предыдущем подразделе рассмотрены подходы к оценке характеристик детекторов. Целью же текущего подраздела является оценка параметров потока импульсного тормозного излучения.

Обобщённой характеристикой параметра импульса тормозного

излучения является интегральная энергия всех фотонов, излучаемых источником за один импульс. В работе [19] рассмотрено несколько подходов к оценке флуктуаций этого параметра. Все эти подходы основаны на частном представлении выражения (1.1)

$$I_{0m} = \alpha I. \quad (4.1)$$

где α и I – независимые случайные величины, причем $\overline{\alpha} = 1$, α характеризует флуктуации мощности дозы излучения от импульса к импульсу; I – взаимодействие фотонов с веществом объекта исследования и процесс регистрации фотонов детектором.

Из предложенных в работе [19] способов оценки $\sigma^2\alpha$ наиболее приемлемым является способ, основанный на оценке степени взаимной связи сигналов с радиометрических детекторов по величине выборочной ковариации. Соответствующее выражение имеет вид

$$\sigma^2\alpha \approx \frac{\text{cov}(I_i, I_j)}{\overline{I_i I_j}}, i \neq j. \quad (4.2)$$

Для значительных объёмов выборок оценки $\sigma^2\alpha$ для любых пар детекторов должны быть близки. Мониторинг текущего значения $\sigma\alpha$ позволит своевременно обнажить негативные тенденции в изменении параметров источника тормозного излучения и принять соответствующие меры.

Теоретически ожидаемый вклад флуктуаций случайной величины α в выборочные плотности распределения случайных величин I должен быть одинаков для всех детекторов системы детектирования ИДК. Существенное различие плотностей распределения $f_I(x)$ для одного или нескольких детекторов должно повлечь тщательный анализ такого фактора на предмет выявления причин различия и правильности функционирования детектора.

Из сказанного выше следует необходимость включения в алгоритм обработки информации ИДК блоков отслеживания значения $\sigma\alpha$ и анализа плотностей распределения сигналов с радиометрических детекторов по воздуху. Так как измерения по воздуху предусмотрены процедурой калибровки

по белому, а схема обработки является крайне простой, то дополнительных временных затрат на формирование изображений не потребуется, а вычислительные затраты будут минимальными.

4.3 Оценка трансформации шумов на этапе применения схемы отношения

Схема отношения предназначена для уменьшения влияния флуктуаций параметров импульсов на оценку характеристик объекта контроля: толщины; плотности; эффективного атомного номера. Выше подчеркнута, что схема в большей степени компенсирует флуктуации электронов, сбрасываемых на мишень, и в меньшей степени компенсирует флуктуации максимальной энергии и геометрического положения оси пучка. Представляют интерес не только уровни указанных флуктуаций, но их остаточное интегральное значение. Характеристики остаточных флуктуаций могут послужить дополнительным информативным параметром для оценки технического состояния источника тормозного излучения.

Выражение (2.12) может быть записано в виде

$$y = \beta \frac{I_{ms}}{I_{rs}}, \quad (4.3)$$

здесь β – независимая от отношений I_{ms}/I_{rs} случайная величина, $\bar{\beta} = 1$. Эта случайная величина характеризует остаточные флуктуации после применения схемы отношения.

Из всех подходов, описанных выше, предпочтительным является способ, основанный на определении коэффициентов ковариации между парами измеренных случайных величин y_i и y_j , $i \neq j$

$$\sigma^2 \beta \approx \frac{\text{cov}(y_i, y_j)}{y_i y_j}. \quad (4.4)$$

Значение $\sigma\beta$ может быть оценено из измерений ослабления излучения

по воздуху, проводимых на стадии реализации калибровки по «белому».

При необходимости возможно определение флуктуаций максимальной энергии тормозного излучения на основе использования формулы (3.13) при проведении калибровочных испытаний способа распознавания материалов методом дуальных энергий. В процессе испытаний просвечивается специальный тестовый объект, фрагменты которого отличаются по толщине и эффективному атомному номеру. Процедура калибровочных испытаний производится достаточно редко, поэтому предпочтительнее осуществлять оценку технического состояния источника излучения по параметру β .

Из замечания 3 следует, в параметре β скрыта информация не только по флуктуациям максимальной энергии, но и флуктуациям геометрического положения оси пучка. Выделить эти флуктуации для системы детектирования, типичной для ИДК чрезвычайно сложно, но в этом и нет необходимости, так как техническое состояние источника оценивается в результате совокупного анализа всех случайных величин β_{ij} .

Если оценка нестабильности положения оси пучка является необходимой, то можно воспользоваться тем, что в воздухе при измерении сигналов по схеме отношения влияние флуктуаций числа сбрасываемых электронов и максимальной энергии практически сводится к нулю при одинаковых эффективных геометрических размерах детекторов и точной ориентации их осей симметрии на источник излучения. Для оценки уровня флуктуаций геометрического положения оси может быть использовано выражение (3.18) с предварительным тщательным измерением углового распределения тормозного излучения.

Дополнительно к сказанному выше можно выдвинуть предположение о том, что вклад флуктуаций геометрического положения оси пучка для пар детекторов близких и удалённых от среднего положения оси пучка тормозного излучения значительно отличается. Указанное предположение проверяется экспериментально для измерений по воздуху.

В разделе показано, что совокупность параметров $\sigma^2\alpha$ и $\sigma^2\beta$ для оценки технического состояния источника тормозного излучения. Помимо этого, представляют интерес и относительные сигналы u для оценки комплексного состояния элементов системы источник излучения – линейка радиометрических детекторов.

5 Экспериментальная оценка косвенных информационных параметров технического состояния системы источник излучения – линейка радиометрических детекторов ИДК

Для проверки работоспособности методик, изложенных выше, на инспекционном досмотровом комплексе Томского политехнического университета была проверена серия экспериментов. На рисунке 5.1 приведено изображение ИДК ТПУ.



Рисунок 5.1 – Инспекционно-досмотровый комплекс с бетатроном МИБ-9:
 1 – бокс с бетатроном; 2 – щелевой коллиматор; 3 – детекторный портал;
 4 – горизонтальная линейка детекторов; 5 – вертикальная линейка детекторов;
 6 – тестовый объект; 7 – операторская

Основные технические характеристики ИДК ТПУ:

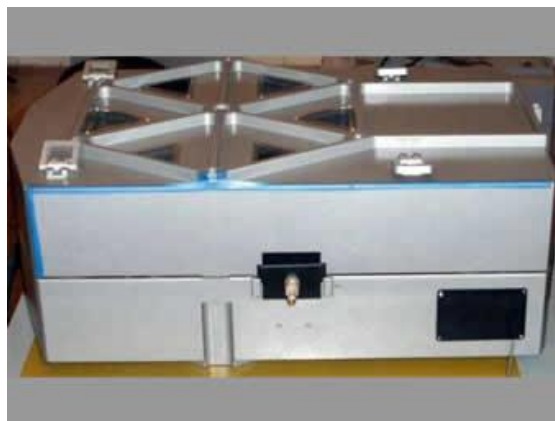
- диапазон максимальных энергий тормозного излучения 4 – 9 МэВ;
- количество детекторов 864;
- расстояние от источника излучения до линейки детекторов 4,2 м;
- высота сканируемого объекта до 2,5 метров;
- размер сцинтилляционного монокристалла детектора $4 \times 6 \times 35 \text{ мм}^3$;
- пространственное разрешение 3 мм в центре сканируемого объекта.

В процессе экспериментов в качестве источников высокоэнергетического тормозного излучения использовались бетатроны МИБ-9/4 и МИБ 7,5/4, которые изготовлены в Томском политехническом университете.

На рисунке 5.2 изображены бетатроны на 7,5 и 10 МэВ, которые применяются в инспекционных досмотровых комплексах.



a



b

Рисунок 5.2 – Малогабаритные бетатроны: a – МИБ-7,5; b – КРАБ (10 МэВ)

В таблице 5.1 приведены основные технические данные линейки бетатронов, производимых в ТПУ.

Таблица 5.1 – Технические характеристики малогабаритных бетатронов

№ пп	Характеристика	Модель					
		МИБ-4	МИБ-5	МИБ-6	МИБ-7,5	КРАБ	«Шелест-Б»
1	Максимальная энергия, МэВ	4	4	6	7,5	10	4,5
2	Мощность дозы тормозного излучения на 1 м от мишени, сГр/мин	1	3	3,0	5	20	2
3	Размер фокусного пятна, мм ²	0,3×2	0,3×2	0,3×3	0,3×3	0,5×3	0,3×3
4	Частота следования циклов ускорения, Гц	200	300	200	200	150	200
5	Потребляемая мощность, кВт	1,5	2,5	2,0	2,5	3,6	1,6
6	Максим. просвечиваемая толщина, мм:						
	сталь	150	150	250	300	350	200
	бетон	600	800	1000	1200	1500	—
7	Относительная рентгенографическая чувствительность, %	1	1	0,6	0,6	1	1

Инспекционный досмотровый комплекс функционировал в режиме распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов методом дуальных энергий для пар максимальных энергий 4–7,5 МэВ, 4,5–7,5 МэВ и 4,5–9 МэВ. Испытания проводились для различных уровней мощности дозы излучения.

Тормозное излучение регистрировалось двумя системами детектирования – штатной системой детектирования ИДК ТПУ на основе сцинтилляторов CdWO_4 и мобильной портативной системой детектирования на базе сцинтилляторов CsI . Мобильная портативная система детектирования произведена фирмой PowerScan (КНР). Эта система представляет собой объединение двух параллельных линейных детекторов со встроенным программным обеспечением для калибровки по «чёрному» и уменьшения вклада послесвечения сцинтилляторов.

5.1 Оценка темновых сигналов радиометрических детекторов и степени их однородности

В процессе исследований измерялись выборочные средние значения радиометрических сигналов с детекторов для выключенного источника тормозного излучения $\overline{I_{D_i}}$, $i=1\dots n$, здесь n – количество детекторов в линейке. Время единичного акта измерения соотносилось с длительностью импульса излучения. Помимо средних значений оценивались выборочные среднеквадратичные отклонения сигналов σ_{D_i} . Выборочные плотности распределения темновых сигналов $f_{D_i}(x)$ в штатном режиме эксплуатации ИДК, то есть при формировании радиографических изображений объектов досмотрового контроля, не определяются. Они вычисляются на стадии проведения специальных калибровок.

На рисунке 5.3 для иллюстрации приведены типичные зависимости $\overline{I_{D_i}}$, σ_{D_i} для штатной системы детектирования ИДК ТПУ и детекторов фирмы

«PowerScan». В результате анализа данных, приведённых на рисунках 5.3.a и 5.3.b, можно сделать о достаточной однородности средних значений и среднеквадратических отклонений темновых сигналов с радиометрических детекторов. По среднему значению для системы детектирования ИДК выделяется один детектор. Отличие в лучшую сторону однородности средних значений и среднеквадратических отклонений темновых сигналов детекторов фирмы PowerScan обусловлено, вероятнее всего, более тщательным подбором детекторов и их настройкой.

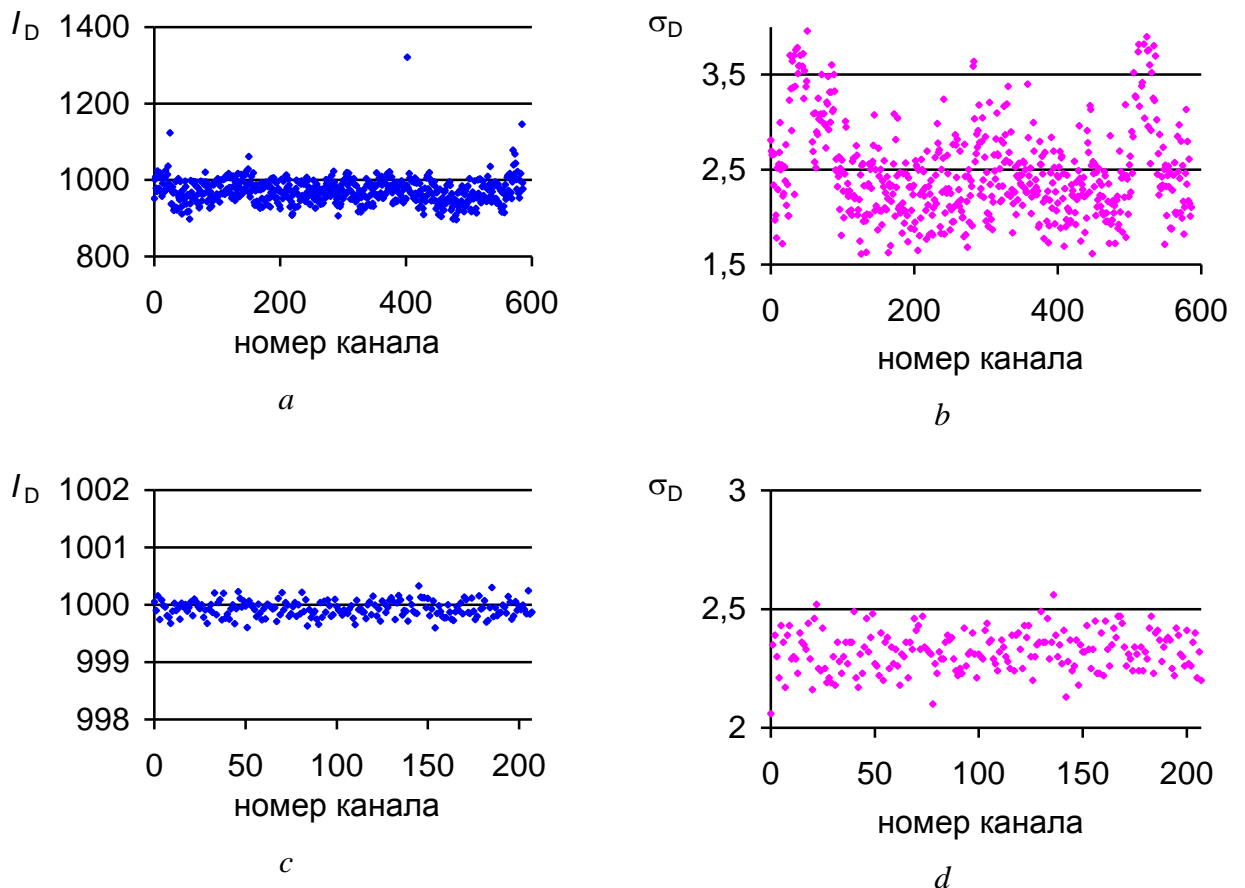


Рисунок 5.3 – Характеристики темновых сигналов, *a, b* – ИДК ТПУ, *c, d* – PowerScan:
a – средние значения I_D ; *b* – среднеквадратические отклонения σ_D

Анализ корреляций случайных величин I_{Di} и I_{Dj} , $i \neq j$ для рассматриваемых систем детектирования доказал их независимость, так как коэффициент корреляции не превысил уровня 0,12.

5.2 Анализ радиометрических сигналов при измерениях по воздуху

Откалиброванные по «чёрному» радиометрические сигналы, полученные при измерениях по воздуху, являются основой для калибровки по «белому». Помимо этого, они позволяют оценить возможные изменения технического состояния детекторов и источника высокоэнергетического тормозного излучения. На этом этапе анализу подвергаются случайные величины $I_i = J_i - \overline{I_{Di}}$, $i=1 \dots n$. Вычисляются выборочные средние значения и среднеквадратические отклонения анализируемых случайных величин – $\overline{I_i}$, σI_i , а также выборочные плотности распределения $f_i(x)$.

При изготовлении радиометрических детекторов стремятся к идентичности сцинтилляторов, фотоприёмников, усилителей и т.п. Кроме этого производители систем детектирования стараются ориентировать блоки детекторов на источник излучения, что приводит к близости условий регистрации. Поэтому разумно ожидать близость выборочных плотностей распределения $f_i(x)$ для различных детекторов. Существенные отличия будут свидетельствовать, прежде всего, о нарушении геометрии регистрации.

Логично предположить, что изменение технического состояния детекторов и источника тормозного излучения связаны с отклонениями выборочных характеристик анализируемых случайных величин.

О негативных тенденциях при долговременной эксплуатации ИДК будет также свидетельствовать увеличение степени неоднородности детекторов по указанным выше характеристикам детекторов всей системы или отдельных блоков детектирования.

На рисунке 5.4 приведены зависимости $\overline{I_i}$ и σI_i от номера детектора для системы детекторов PowerScan для различных максимальных энергий тормозного излучения (4 и 7,5 МэВ). Мощность тормозного излучения составила 6 сГр/мин. Анализ представленных результатов показывает существенную неоднородность детекторов по среднему значению и

среднеквадратическому отклонению сигналов. Следует отметить три детектора, параметры сигналов которых резко выделяются на фоне других детекторов.

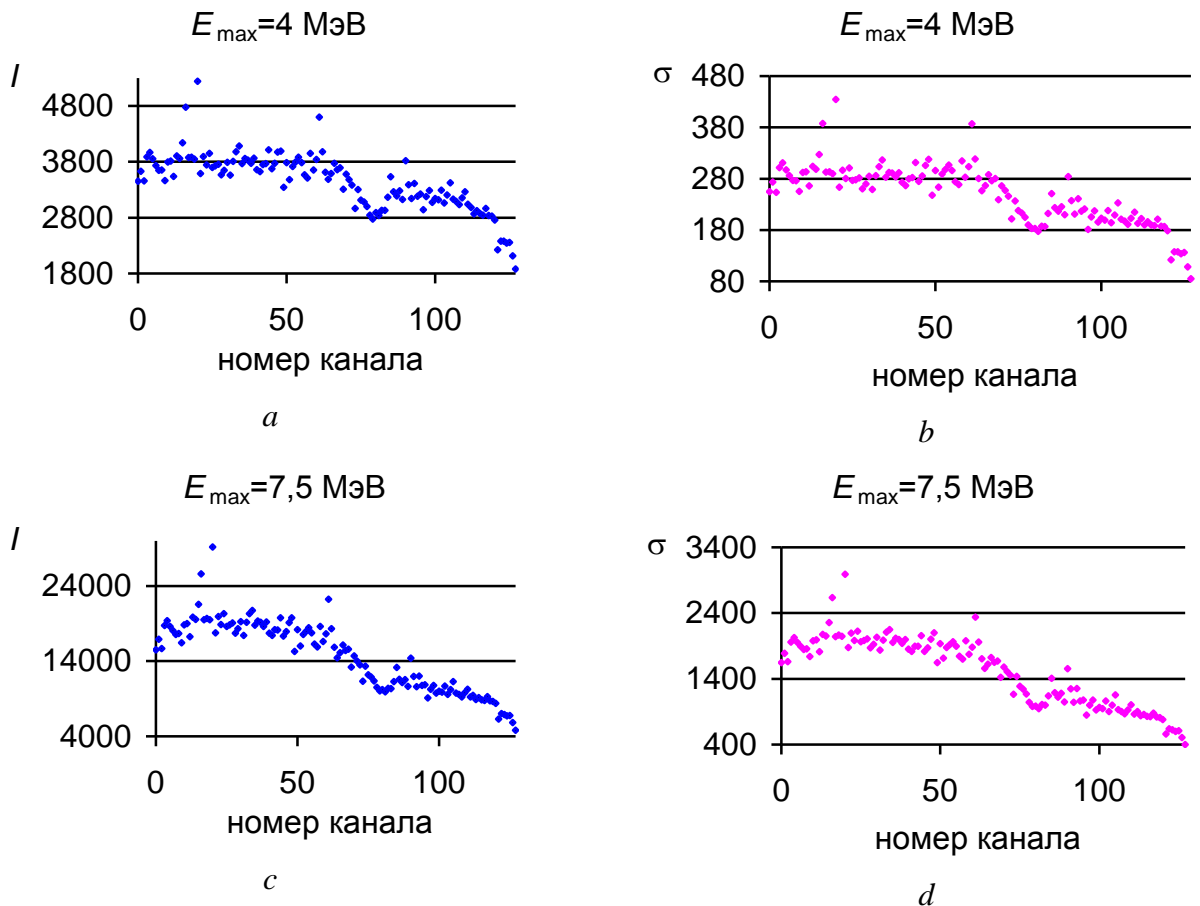


Рисунок 5.4 – Характеристики сигналов по воздуху для детекторов PowerScan: a, c – средние значения I ; b, d – и среднеквадратические отклонения σ

В предыдущих разделах показано, что возможная связь случайных величин I_i и I_j , $i \neq j$ обусловлена статистической природой изменения мощности дозы излучения от импульса к импульсу. Дополнительными информационными параметрами являются ковариации сигналов $\text{cov}(I_i, I_j)$, $i \neq j$, нормированные на средние значения сигналов. Ожидаемый результат близок к константе. Причём указанная константа близка к $\sigma^2 \alpha$. Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил сформулированное выше предположение. Для системы детекторов PowerScan среднеквадратические отклонения $\sigma \alpha$ для максимальной энергии тормозного излучения 4 МэВ

близки к 7,5 %, а для $E_{\max}=7,5$ МэВ – 10,5 %. Повторные измерения при той же мощности дозы излучения оставили указанные показатели без изменения.

В результате обработки радиографических изображений, полученных при снижении уровня мощности дозы до уровня 1,5 сГр/мин, оценка σ_a составили 3,8 % для $E_{\max}=4$ МэВ и 8,5 % для $E_{\max}=7,5$ МэВ. Дополнительно были сформированы радиографические изображения для максимальных энергий 5,5 и 6,5 МэВ, для них значения σ_a составили 6,3 % и 7,3 % соответственно.

На рисунке 5.5 приведены зависимости среднего значения и среднеквадратического отклонения от номера детектора для штатной системы детекторов ИДК ТПУ для $E_{\max}=4,5$ МэВ и $E_{\max}=7,5$ МэВ. Мощность тормозного излучения составила 5 сГр/мин.

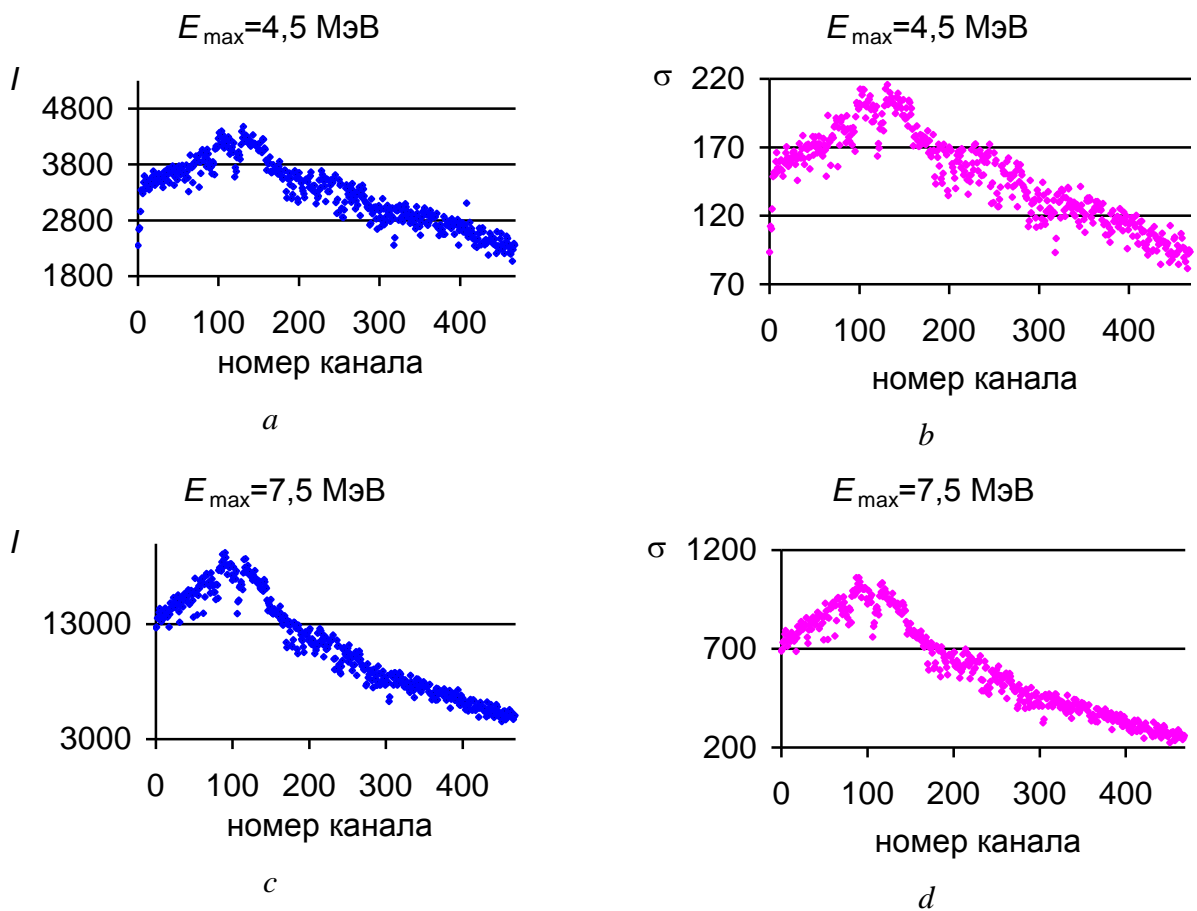


Рисунок 5.5 – Характеристики сигналов по воздуху для детекторов ИДК ТПУ:
 а, с – средние значения I ; b, d –и среднеквадратические отклонения σ

На зависимостях, приведённых на рисунке 5.6, наблюдается ярко выраженное соответствие угловому распределению тормозного излучения. Степень неоднородности радиометрических детекторов по среднему значению сигнала и по среднеквадратическому отклонению является существенной.

Для системы детекторов ИДК среднеквадратические отклонения σ_α для детекторов, соответствующих моде распределений, для $E_{\max}=4,5$ МэВ близки к 3,8 %, а для $E_{\max}=7,5$ МэВ – 5,3 %. Значения для периферийных детекторов значительно меньше. Для иллюстрации указанного факта и формулировки возможных гипотез на рисунке 5.5 приведены зависимости σ_{α_i} для двух максимальных энергий тормозного излучения.

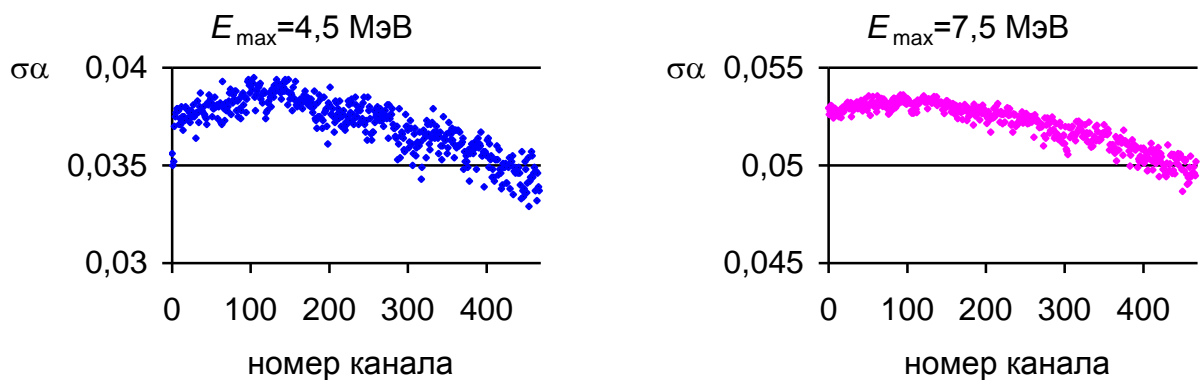


Рисунок 5.6 – Зависимость σ_α от номера детектора ИДК ТПУ

Из совместного анализа данных, приведённых на рисунках 5.5 и 5.6 можно сделать предположение о вкладе углового распределения излучения в смещение значений σ_α . Впрочем, отклонение σ_α от среднего значения не превосходит 10 %, поэтому за оценку σ_α можно брать его среднее значение по совокупности детекторов.

Приведённые выше результаты экспериментов свидетельствуют о необходимости оценки σ_α в процессе эксплуатации ИДК.

5.3 Анализ сигналов со схемы отношения

Строго говоря, схема отношения предваряет калибровку по «белому». Она предназначена для компенсации флуктуации параметров излучения от импульса к импульсу. На выходе схемы отношения измеряется отношение сигналов с двух детекторов. Делимым является сигнал с измерительного детектора, а делителем – сигнал с опорного детектора. Применительно к обработке сигналов по воздуху детекторы делятся на измерительные и опорные достаточно условно. Как правило, периферийные детекторы линейки находятся вне тени объекта контроля, поэтому их используют в качестве опорных детекторов. Пусть в качестве опорного детектора выбран первый детектор. Исследуются случайные величины y_i , $i=2\dots n$. Оцениваются выборочные средние значения и среднеквадратичные отклонения \bar{y}_i и σ_{y_i} и выборочные плотности распределения вероятностей $f_{y_i}(x)$.

На рисунках 5.7.a, 5.7.b приведены зависимости средних значений y_i и среднеквадратических отклонений σ_{y_i} от номера детектора.

Для оценки технического состояния источника излучения представляет интерес уровень остаточных флуктуаций – $\sigma^2\beta$. В соответствии с формулой (4.4) предполагается, что $\sigma^2\beta \approx \frac{\text{cov}(y_i, y_j)}{y_i y_j}$, $i, j=2\dots n$. $i \neq j$. На рисунке 4.c приведена зависимость $\sigma\beta_{1,i}$. Анализ этой зависимости подтвердил упомянутое выше предположение.

Отметим, что совокупность полученных выражений, реализованная в виде дополнительных блоков к программе Dual, позволяет последовательно отследить трансформацию шумов от исходных радиографических изображений до изображений параметров метода дуальных энергий и параметров распознавания. Результаты этого отслеживания являются основой заключения об адекватности математической модели ИДК реальности.

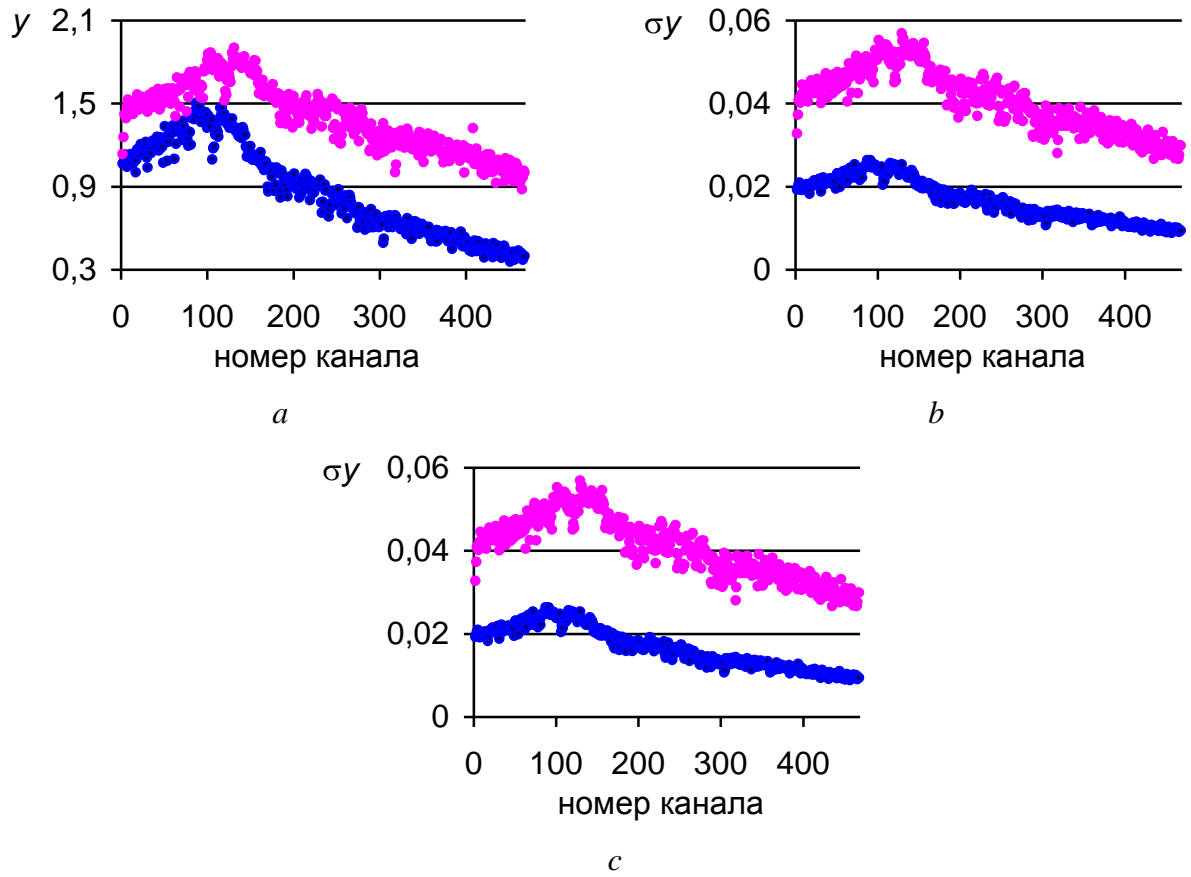


Рисунок 5.7 – Характеристики сигналов y по воздуху для детекторов ИДК ТПУ,
 ● – $E_{\max}=4,5$ МэВ, ● – $E_{\max}=7,5$ МэВ:
a – средние значения y ; *b* – среднеквадратические отклонения σ_y ; *c* – $\sigma\beta$

6 Дополнения к программе Dual

Программа Dual [32] была реализована по заказу фирмы PowerScan для распознавания материалов объектов досмотрового контроля и их структурных фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий. Анализ опыта практического использования ИДК с функцией распознавания материалов ОДК привёл к необходимости введения в структуру программы Dual дополнительного блока, предназначенного для анализа функционирования системы детектирования и импульсного источника высокоэнергетического тормозного излучения.

Дополнения к программе Dual касаются временного отслеживания технического состояния системы источник тормозного излучения – линейный детектор, поэтому для удобства практического использования выделен специализированный блок – «Control unit».

Этот блок состоит из нескольких составных блоков.

1. Оценка характеристик темновых сигналов радиометрических детекторов: $\overline{I_{D_i}}$; σ_{D_i} ; $f_{D_i}(x)$. Запись в базу данных.

2. Оценка параметров радиометрических сигналов для «low energy» и «high energy» при измерениях по воздуху: $\overline{I_{ms_i}}$; δI_{ms_i} ; $f_{ms_i}(x)$. Запись в базу данных.

3. Оценка уровня флуктуаций мощности излучения от импульса к импульсу для «low energy» и «high energy» при измерениях по воздуху σ_a . Запись в базу данных.

4. Оценка уровня остаточных флуктуаций параметров излучения в импульсе для «low energy» и «high energy» на выходе схемы отношения σ_β . Запись в базу данных.

5. Анализ изменений в базе данных на предмет необходимости принятия решений. Варианты решений:

– проведение калибровки по специализированному тестовому объекту с

целью уточнения калибровочных коэффициентов для алгоритма распознавания методом линий уровней;

– настройка или ремонт блоков системы детектирования;

– настройка или ремонт источника высокоэнергетического тормозного излучения.

6. Анализ изменения калибровочных коэффициентов алгоритма распознавания с целью информирования пользователя о предельных параметрах системы распознавания: предельному разрешению по эффективному атомному номеру; производительности; минимальному размеру изображения фрагмента с достоверно распознаваемым материалом.

Отметим, что детальное и корректное наполнение содержанием блока анализа и принятия решений (блок 5) и блока информирования пользователя (блок 6) возможно только в результате анализа длительной эксплуатации конкретного инспекционного досмотрового комплекса с привлечением информации об эксплуатации аналогичных комплексов.

Подходы к исследованию текущего технического состояния источника высокоэнергетического тормозного излучения и системы детектирования не исчерпываются теми, что рассмотрены выше. Изменения технического состояния элементов ИДК может быть также оценено исходя из оценок радиографических параметров ИДК [31]. Указанные оценки должны быть дополнены анализом уровнем шумов изображений параметров метода дуальных энергий.

7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

7.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения технологий QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1. Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:
 - влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
 - перспективность рынка;
 - пригодность для продажи;
 - перспективы конструирования и производства;
 - финансовая эффективность;
 - правовая защищенность.
2. Показатели оценки качества разработки:
 - динамический диапазон;
 - вес;
 - ремонтпригодность;
 - энергоэффективность;
 - долговечность;
 - эргономичность;
 - унифицированность;

– уровень материалоемкости разработки.

Для сравнения конкурентоспособности термогравиметрического метода выбран метод сканирующей электронной микроскопии. Выбранные показатели для оценки конкурентоспособности метода показаны в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда	0,5	100	100	1	0,5
2. Простота эксплуатации	0,2	95	100	0,95	0,19
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
3. Цена	0,3	30	100	0,3	0,09
4. Финансовая эффективность научной разработки	0,1	60	100	0,6	0,6
Итого	1				

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum V_i \cdot B_i, \quad (7.1)$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

$$P_{cp} = 0,5 \cdot 100 + 0,2 \cdot 95 + 0,3 \cdot 30 + 0,1 \cdot 60 = 75$$

Показатель P_{cp} равный 75 говорит о том, что перспективность разработки считается выше средней и поэтому ее следует развивать.

7.2 Планирование научно-исследовательских работ

7.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по видам работ приведен в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, лаборант
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Подготовка образцов для экспериментов	Лаборант, студент
	6	Проведение экспериментов	Лаборант, студент
Обобщение и оценка результатов	7	Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	Лаборант, студент
Оформления отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	Руководитель, лаборант, студент

7.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (7.2)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.; t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, то есть пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств, чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (7.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.; $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

7.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{кал}, \quad (7.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях; $k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (7.5)$$

где $T_{кал} = 365$ – количество календарных дней в году; $T_{вых} = 104$ – количество выходных дней в году; $T_{пр} = 14$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{кал} = \frac{366}{366 - 104 - 14} = 1,48$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округляем до целого числа. Все рассчитанные значения сводим в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}	Длительность работ в календарных днях, T_{ki}				
	t_{min} , чел-дни			t_{max} , чел-дни			$t_{ож}$, чел-дни									
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3							
Составление и утверждение технического задания	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руковод.	2	2	2	3	3	3
Подбор и изучение материалов по теме	5	5	5	9	9	9	6,6	6,6	6,6	Студ.	7	7	7	10	10	10
Выбор направления исследований	4	4	4	6	6	6	4,8	4,8	4,8	Руковод.	5	5	5	7	7	7
Календарное планирование работ по теме	2	2	2	4	4	4	2,8	2,8	2,8	Руковод. лабор.	2	2	2	3	3	3
Подготовка образцов для экспериментов	2	2	2	4	4	4	4,8	4,8	4,8	Лабор. студ.	3	3	2	4	4	4
Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	2	3	5	4	6	8	2,8	4,2	6,2	Лабор. студ.	2	3	4	3	4	6
Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	3	3	3	5	5	5	3,8	3,8	3,8	Лабор. студ.	2	2	2	3	3	3
Составление пояснительной записки	5	5	5	7	7	7	5,8	5,8	5,8	Руковод. лабор. студ.	2	2	2	3	3	3

На основе таблицы 7.3 строим план график. В таблице 7.4 приведён календарный план график проведения НИР по теме.

Таблица 7.4 – Календарный план график проведения НИР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дни	Продолжительность выполнения работ										
				Фев.		Март			Апрель					
				2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление ТЗ	Руковод.	3	■										
2	Изучение материалов	Студ.	10	□										
3	Выбор направления	Руковод.	7		■									
4	Планирование работ	Руковод. лабор.	3			■	■							
5	Подготовка образцов	Лабор. студ.	4				□	□						
6	Проведение экспериментов	Лабор. студ.	6					□	□					
7	Расшифровка данных	Лабор. студ.	3							□	□			
8	Пояснительная записка	Руковод. лабор. студ.	3									■	□	□

■ – руководитель, □ – студент, □ – лаборант

7.3 Бюджет научно-технического исследования

7.3.1 Расчет материальных затрат НИИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

– приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;

– покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования, зданий, сооружений, других основных средств и прочее), а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов;

– покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;

– сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований (испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований);

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) * \sum_{i=1}^m C_i + N_{расхi}, \quad (7.6)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.); k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величина коэффициента k_T , отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной

удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносим в таблицу 7.5.

Таблица 7.5 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы(З _м), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	Лист	100	100	100	1,2	1,2	1,2	138	138	138
Картридж для принтера	Шт.	1	1		1000	1000		1150	1150	1150
Итого								1288	1288	1288

7.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме.

Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Расчет затрат по данной статье заносится в таблицу 7.6. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Таблица 7.6 – Расчет бюджета затрат на приобретение оборудования для научных работ

п/п	Наименование оборудования	Количество единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Сканер Microtek Medi-5000	1	0	0	100	0	0	100	0	0
2	Негатоскоп Н-85/220	1	1	1	38	38	38	38	38	38
3	Сканер Microtek Medi-3200	0	1	0	0	434,25	0	0	434,25	0
4	Персональный компьютер	1	1	1	20	20	20	20	20	20
5	Сканер EPSON EXPESSION 10000XL	0	0	1	0	0	675,5	0	0	675,5
Итого								158	492,25	733

7.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Расчет основной заработной платы приводится в таблице 7.7.

Таблица 7.7 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.			Зарплата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу(окладам), тыс. руб.		
			Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Составление и утверждение технического задания	Руковод.	1,8	1,8	1,8	1,46	1,46	1,46	2,63	2,63	2,63
2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	6,6	6,6	6,6	0,25	0,25	0,25	1,65	1,65	1,65
3	Выбор направления исследований	Руковод.	4,8	4,8	4,8	1,46	1,46	1,46	7	7	7
4	Календарное планирование работ по теме	Руковод., лаборант	2,8	2,8	2,8	2	2	2	5,6	5,6	5,6
5	Подготовка образцов для экспериментов	Лаборант, студент	4,8	4,8	4,8	0,79	0,79	0,79	3,8	3,8	3,8
6	Проведение экспериментов	Лаборант, студент	2,8	4,2	6,2	0,79	0,79	0,79	2,2	3,3	4,9
7	Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	Лаборант, студент	3,8	3,8	3,8	0,79	0,79	0,79	3	3	3
8	Составление пояснительной записки	Руковод., лаборант, студент	5,8	5,8	5,8	2,25	2,25	2,25	13	13	13
Итого									38,88	39,98	41,58

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИТ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (7.7)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

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

$$Z_{осн} = T_p \cdot Z_{дн}, \quad (7.8)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника; T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. ; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (7.9)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

В таблице 7.8 приведён баланс рабочего времени.

Таблица 7.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Лаборант	Студент
Календарное число дней	366	366	366
Количество нерабочих дней – выходные – праздничные	118	118	118
Потери рабочего времени – отпуск – невыходы по болезни	48	48	72
Действительный годовой фонд рабочего времени	200	200	176

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} * (1 + k_{пр} + k_d) * k_p, \quad (7.10)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$); k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15- 20 % от $Z_{тс}$); k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

В таблице 7.9 приведён расчёт основной заработной платы.

Таблица 7.9 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , тыс. руб.	$Z_{дн}$, тыс. руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, тыс. руб.
Руководитель	28924,94	1,3	1,3	1,3	135368,72	7,6	16	121,6
Лаборант	13000	1,3	0	1,3	38870	2,03	26	38,57
Студент	6595,7	0	0	1,3	8,57411	0,46	19	11,96
Итого $Z_{осн}$								172,13

7.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} * (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (7.11)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%

В таблице 7.10 приведены отчисления во внебюджетные фонды.

Таблица 7.10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руководитель	121,6	121,6	121,6
Лаборант	32,48	34,51	38,57
Студент	10,58	11,04	11,96
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271		
Итого			
Исполнение 1	44,62		
Исполнение 2	45,23		
Исполнение 3	46,65		

7.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) 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 таблице 7.11 приведен расчёт бюджета затрат НТР.

Таблица 7.11 – Расчет бюджета затрат НТР

Наименование статьи	Сумма, тыс.руб.			Примечание
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	
1. Материальные затраты НТИ	1,288	1,288	1,288	
2. Затраты на спецоборудование для научных работ	733	492,25	158	
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	172,13	166,90	164,64	
4. Отчисления во внебюджетные фонды	46,65	45,23	44,62	
5. Накладные расходы	152,5	112,9	58,97	16% от суммы 1-4
6. Бюджет затрат НТИ	1105,56	818,57	427,52	Сумма ст. 1-5

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

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (7.12)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп } i}$ – интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_{pi} = \sum a_i * b_i, \quad (7.13)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

В таблице 7.12 приведена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Таблица 7.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1.Повышение производительности труда	0,5	5	5	5
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	5	5	5
3. Цена	0,3	3	4	5
4. Финансовая эффективность научной разработки	0,1	5	5	5
Итого	1			

$$I_{p1} = 5 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1 = 4,4$$

$$I_{p2} = 5 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1 = 4,7$$

$$I_{p3} = 5 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1 = 5,0$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп1}} = \frac{I_{\text{р1}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп1}}}, I_{\text{исп2}} = \frac{I_{\text{р2}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп2}}} \text{ и т.д.}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных.

Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}}. \quad (7.14)$$

В таблице 7.13 приведена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 7.13 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,74	0,386
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,4	4,7	5,0
3	Интегральный показатель эффективности	4,4	6,35	12,95
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,69/0,34	0,49/1,44	2,94/2,04

Проведя расчет энерго- и ресурсоэффективности и сравнив различные исполнения приходим к выводу, что исполнение № 3 является наиболее выгодным.

8 Социальная ответственность

Введение

В данной ВКР приведены результаты разработки адаптивного метода оценки характеристик инспекционных досмотровых комплексов с функцией распознавания материалов объектов контроля. Данное исследование увеличит вероятность обнаружения запрещённых вложений, улучшит качество распознавания материалов объектов досмотрового контроля и их фрагментов, позволит получить своевременную информацию о техническом состоянии компонентов инспекционных досмотровых комплексов.

Для самой процедуры оцифровки необходим специальный сканер для рентгеновских снимков, а также сам экспонированный рентгеновский снимок. Сама процедура заключается в классической расшифровке экспонированной рентгеновской пленке при помощи негатоскопа, а также в последующей оцифровке пленки при помощи специального сканирующего устройства.

8.1 Производственная безопасность

Объектом исследования является экспонированная рентгеновская пленка, которую расшифровывают и оцифруют при помощи специальных сканирующих устройств. Далее в таблице 8.1 приведены вредные и опасные факторы, возникающие во время работы.

Классическая расшифровка экспонированной рентгеновской пленки необходима для статистики и сравнения с оцифрованной пленкой. Классическая расшифровка заключается в использовании специального прибора – негатоскоп.

Негатоскоп – устройство для просмотра рентгенографических (рентгеновских пленок) полостей. Это устройство представляет собой

устройство со светящимся экраном с нанесенными рентгеновскими снимками. Яркость экрана устройства очень высока, что позволяет вам освещать изображения с высокой интенсивностью света. Главным образом из-за различий в яркости свечения. Так стандартный негатоскоп имеет яркость не менее 30000 Кд/м².

Таблица 8.1 – Вредные и опасные факторы, возникающие при проведении экспериментов

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (По ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Классическая расшифровка экспонированной рентгеновской пленки при помощи негатоскопа	1. Повышенная яркость света. 2. Нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда)	–	СНиП 23-05-95
2. Обработка данных при помощи ЭВМ	1. Повышенный уровень электромагнитного излучения	Электрический ток	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 СанПиН 2.2.4.1191-03

Вредный фактор заключается в том, что даже если дефектоскопист смотрит через рентгеновскую пленку на негатоскоп, и световой поток, проходящий через пленку, достаточно мал, то при смене пленки, дефектоскопист попадает под действие полной яркости негатоскопа. Что негативно сказывается на общем психофизическом состоянии дефектоскописта, а также на самом зрении, в данном случае сильно страдает сетчатка глаза. Вследствие чего появляется утомляемость, усталость, боль в глазах, и последующая расшифровка становится достаточно трудоемкой, если учесть что общее количество пленки бывает достаточно большим, и дефектоскопист может проводить за расшифровкой несколько часов. Согласно СНиП 23-05-95, норма освещенности для лаборатории должна составлять при общем искусственном освещении 400 лк.

Сама оцифровка экспонированной рентгеновской пленки не представляет, каких-либо вредных или опасных факторов для человека, так как не связана ни с одним из факторов, представленных в ГОСТ 12.0.003-74.

Проведение работ на электроустановках осуществляется в строгом соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей», «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилами техники безопасности и производственной санитарии в электронной промышленности». Последние учитывают особенности отрасли и специфику радиоэлектронного оборудования. Все вышеуказанные «Правила» распространяются на работы с действующими электроустановками и радиоэлектронным оборудованием.

Основная часть исследовательской работы будет проводиться за персональным компьютером. Помещения, в которых будет проводиться работа за компьютером должны иметь естественное и искусственное освещение. Освещенность на поверхности стола в зоне работы должна быть 300 – 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана компьютера. Освещенность поверхности экрана компьютера не должна быть более 300 лк. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%. [СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03].

Источником электромагнитных полей являются дисплеи (мониторы), особенно дисплеи с электронно-лучевыми трубками. Излучением является в малой степени спектр радиочастот. Основным спектром частот является инфракрасный, видимый, и ультрафиолетовый спектр. Инфракрасный и видимый спектр не наносят заметного вреда человеку, если остальные факторы соблюдаются в норме. Ультрафиолетовый спектр излучения в больших дозах приводит к дерматиту кожи, головной боли, рези в глазах. Напряженность электрического поля должна составлять не более 20кВ/м. Поверхностный электростатический потенциал должен быть менее 500В. На расстоянии от 5 до 10 см от экрана монитора уровень напряженности могут достигать 140 В/м, что значительно превышает уровень допустимых

значений СанПиН 2.2.4.1191-03 “Электромагнитные поля в производственных условиях”.

Микроклимат производственного помещения измеряется при помощи заранее установленных показателей. К их числу относятся такие показатели, как:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Проведение работ выполняется в лаборатории. Согласно таблицы 13 СанПиНа 2.2.4.548-96, оптимальными показателями микроклимата, для категории работы по уровню энергозатрат (до 139 Вт) в теплое время года, будут следующими: Температура воздуха – от 22 до 25 С°; температура поверхностей – от 22 до 26 С°; относительная влажность воздуха – от 40 до 60 %; скорость движения воздуха – 0,1 м/с. В холодное время данные показатели будут следующими: Температура воздуха – от 22 до 24 С°; температура поверхностей – от 21 до 25 С°; относительная влажность воздуха – от 40 до 60 %; скорость движения воздуха – 0,1 м/с.

8.2 Экологическая безопасность

Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.

Процесс исследования не влияет каким-либо образом на окружающую среду, так как не имеет каких-либо расходуемых материалов, которые могли бы оказать влияние на окружающую среду, во время исследования.

Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.

После цифровой обработки экспонированной рентгеновской пленки она не утилизируется в течение определенного времени (время, которое пленка должна находиться в архиве регламентируется НТД). Но всё равно

есть необходимость в утилизации экспонированной рентгеновской пленки, чаще всего непригодные для переработки отходы пленки сжигают. Для этого используется специальная печь, оснащенная электрофильтром, через который пропускают образующийся при сгорании газ.

Фильтр улавливает около 90% пыли, и газ выходит в атмосферу прозрачным, но всё же с примесью различных нетоксичных веществ, а пыль вместе с золой отправляют на завод, где извлекают из нее серебро

Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.

Фильтрация отходов после утилизации пленок, необходимо для защиты воздуха атмосферы.

8.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Проведём анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.

Объект исследования никаким образом не может инициировать ЧС, так как объектом исследования является обыкновенная рентгеновская пленка.

Проведём анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.

Для работы оборудования необходимо электричество. В ходе эксплуатации электрооборудования необходимо соблюдать правила электропожаробезопасности: пользоваться исправным электрооборудованием, питать электрооборудование регламентированным напряжением питания, избегать перегрузок сети. В случае возгорания электрооборудования следует: отключить питание установки, включить пожарную тревогу, вызвать сотрудников пожарной службы по телефону 01 или 010 (для сотового телефона), провести эвакуацию и оповещение сотрудников. Тушить пожар электрооборудования разрешено тушить порошковым огнетушителем.

Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.

В случае поражения током следует освободить пострадавшего от действия электрического тока, то есть отключить цепь тока, выключить рубильник и т.д. В случае отдаленности выключателя от места происшествия, следует перерезать провода или отбросить сухой палкой оборвавшийся конец провода.

Необходимо помнить, что сам пострадавший может являться проводником электрического тока. Также необходимо вызвать скорую помощь, по телефону 03 или 030 (для сотового телефона)

Обсудим правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.

Специальных правовых норм для рабочей зоны не предусмотрено согласно правовым нормам трудового законодательства.

Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Исходя из СНиП 23-05-95, освещенность “Лаборатории научно-технические” Должны обеспечиваться общей освещенностью не менее 400 лк. Для работы с электрооборудованием не предъявляются специальные требования к персоналу.

Заключение

Основным результатом этой работы является набор алгоритмов, позволяющих отслеживать изменения в техническом состоянии инспекционного комплекса, с возможностью идентификации материалов контрольных объектов и их структурных обломков с помощью двухэнергетического подхода.

Отметим наиболее важные результаты, включённые в итоговую квалификационную работу:

1. Математическая модель инспекционного комплекса дополненная модулем, предназначенным для учета влияния нестабильности параметров импульсного излучения на качество распознавания.

2. Алгоритм измерения флуктуаций мощности дозы от импульса к импульсу.

3. Алгоритм оценки остаточных флуктуаций мощности дозы с использованием опорного канала.

4. Экспериментальная оценка однородности темновых сигналов многоканального детектора излучения.

5. Экспериментальная оценка остаточных колебаний мощности дозы от импульса к импульсу.

6. Программа в MathCad для оценки системы детекторов и источника излучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chen, G., Turner, J., Nisius, D., Holt, K., Brooks, A. Linatron Mi6, the X-Ray Source for Cargo Inspection // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 66. – P. 68–74.
2. Brandis, M. Development of a gamma-ray detector for Z-selective radiographic imaging. – Diss. Ph. D. – Hebrew University of Jerusalem, The Racah Institute of physics, 2013.
3. Zav'yalkin, F.M., Osipov, S.P. Effect of the instability of parameters of bremsstrahlung beams on the accuracy of radiometric measurements // *Soviet Journal of Nondestructive Testing*. – 1989. – Vol. 25. – No. 2. – P. 108–112.
4.
www.varian.com/sites/default/files/resource_attachments/LinatronK15.pdf
5. Zentai, G., Partain, L. High-energy (MeV) x-ray imaging with a mercuric iodide imager // *The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. – International Society for Optics and Photonics, 2008. – P. 69351Y-1–69351Y-8.
6. Hogan, M. J. et al. Measurements of gain larger than 10^5 at $12 \mu\text{m}$ in a self-amplified spontaneous-emission free-electron laser // *Physical Review Letters*. – 1998. – Vol. 81. – No. 22. – P. 4867–4870. (гамма-распределение)
7. Pellegrini, C., Ding, X., Rosenzweig, J. Output power control in an X-ray FEL // *Particle Accelerator Conference, 1999*. – IEEE, 1999. – Vol. 4. – P. 2504–2506.
8. Farrell J.P.; Powell J.; Murzina M.; Dudnikov V.; Ivanov A. A new vacuum insulated tandem accelerator for detection of explosives and special nuclear materials // *Nondestructive Detection and Measurement for Homeland Security III*. – Proc. SPIE – 2005. – Vol. 5769. – P. 1–10.
9. 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*. –

IOP Publishing, 2015. – Vol. 81. – no. 1. – no. paper. 012082. – 5 p.

10. Westermark, T. Energy distribution and energy stability of the electron beam from a 5 MeV betatron // *Nuclear Instruments and Methods*. – 1961. – Vol. 10. – P. 145–163.

11. Kaminski, P., Wronka, S. Dedicated detector for verification of X-ray energy in the linear accelerators for cargo screening and industrial radiography // *Polish Journal of Medical Physics and Engineering*. – 2011. – Vol. 17. – no. 3. – P. 121–128.

12. Clayton, J., Shedlock, D., Langeveld, W. G., Bharadwaj, V., Nosochkov, Y. Proposed new accelerator design for homeland security x-ray applications // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 66. – P. 249–259.

13. Regentova, E.E., Zhang, L., Mandava, A.K., Mandava, V.K., Potetti, K.K., Chen, G., Wilson, Z. Advantages and challenges of radiosopic detection of nuclear materials in cargo containers with two megavoltage energy barriers // *Nuclear Technology*. – 2011. – Vol. 175. – no. 1. – P. 276–285.

14. Brandis M. Development of a Gamma-ray Detector for Z-Selective Radiographic Imaging. – thesis submitted towards the Ph. D. degree at the Hebrew University of Jerusalem, The Racah Institute of physics, 2013.

15. Zav'yalkin, F.M., Osipov, S.P. Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions // *Soviet Atomic Energy*. – 1985. – Vol. 59. – no. 4. – P. 842–846.

16. Okulov B.V. Bremsstrahlung intensity near accelerators as a function of electron energy // *Atomic Energy*. – 1968. – Vol. 25. – no. 5. – P. 1237–1237.

17. Kuznetsov P.I. Dependence of bremsstrahlung dose on electron energy // *Atomic Energy*. – 1990. – Vol. 69. – no. 2. – P. 667–669.

18. Garrido T.C. Optimization of a linac based source of bremsstrahlung radiation. – 2010. – 85 p. URL: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10297>

19. Zav'yalkin, F.M., Lomakin, P.L., Osipov, S.P. Method of measuring the fluctuations of bremsstrahlung beam parameters // *Soviet Atomic Energy*. – 1991. – Vol. 70. – no. 1. – P. 77–80.

20. Rouse A. et al. Production of a keV X-ray beam from synchrotron radiation in relativistic laser-plasma interaction // *Physical review letters*. – 2004. – Vol. 93. – no. 13. – no. paper 135005.
21. Norreys P.A. et al. Observation of a highly directional γ -ray beam from ultrashort, ultraintense laser pulse interactions with solids // *Physics of Plasmas*. – 1999. – Vol. 6. – no. 5. – P. 2150–2156.
22. Takagi H., Murata I. Energy Spectrum Measurement of High Power and High Energy (6 and 9 MeV) Pulsed X-ray Source for Industrial Use // *Journal of Radiation Protection and Research*. – 2016. – Vol. 41. – no. 2. – P. 93–99.
23. Sandlin S. X-Ray Inspection Setups for the Disposal Canister Lid Weld // *Working Report*. – Finland: Posiva Oy, 2010.
URL: http://www.posiva.fi/files/1505/WR_2009-98_web.pdf
24. Meissner J. et al. X-ray treatment at 5 MeV and above // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2000. – Vol. 57. – no. 3. – P. 647–651.
25. Lanzl L.H., Hanson A.O. Z dependence and angular distribution of bremsstrahlung from 17-MeV electrons // *Physical Review*. – 1951. – Vol. 83. – no. 5. – P. 959–974.
26. Mandava V.K. Extents and limits of radiosopic detection of nuclear materials in cargo containers with two megavoltage energy barriers // *Theses Dissertations Master of Science Degree*. – , USA, Las Vegas: University Nevada. – 2009. URL: <http://digitalscholarship.unlv.edu/thesesdissertations/170/>
27. Brody W.R. Digital subtraction angiography // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1982. – Vol. 29. – no. 3. – P. 1176–1180.
28. Zych E., Hreniak D., Streck W. Spectroscopic properties of Lu₂O₃/Eu³⁺ nanocrystalline powders and sintered ceramics // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2002. – Vol. 106. – no. 15. – P. 3805–3812.
29. Baek J., De Man B., Harrison D., Pelc N.J. Raw data normalization for a multi source inverse geometry CT system // *Optics express*. – 2015. – Vol. 23. – no. 6. – P. 7514–7526.
30. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical handbook for scientists and*

engineers: Definitions, theorems, and formulas for reference and review. – USA, New York: Courier Corporation, 2000.

31. Michael K.T. The application of quantitative data analysis for the assessment of flat panel x-ray detectors in digital radiography as part of a quality assurance programme // Biomedical Physics & Engineering Express. – 2017. – Т. 3. – №. 3. – С. 035004.

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

Приложение

Выкопировка программы в MathCad для оценки системы детекторов и источника излучения.

Control

l and L - low energy

h and H -high energy

$\underline{\underline{L}} := \text{READPRN}("002-3l.txt")$ $\underline{\underline{H}} := \text{READPRN}("002-3h.txt")$

$\underline{\underline{M}} := \text{cols}(\underline{\underline{L}}) - 1$ 3999

$\underline{\underline{N}} := \text{rows}(\underline{\underline{L}}) - 1$ 607

DARK DATA

$\underline{\underline{MD}} := 45$

$\underline{\underline{i}} := 0 .. \underline{\underline{N}}$

$\underline{\underline{j}} := 0 .. \underline{\underline{MD}}$

$$d\mathbf{l}_i := \frac{\sum_{j=3}^{\underline{\underline{MD}}} L_{i,j}}{\underline{\underline{MD}} - 2}$$

$$\sigma d\mathbf{l}_i := \sqrt{\frac{\sum_{j=3}^{\underline{\underline{MD}}} (L_{i,j} - d\mathbf{l}_i)^2}{\underline{\underline{MD}} - 3}}$$

$$d\mathbf{h}_i := \frac{\sum_{j=3}^{\underline{\underline{MD}}} H_{i,j}}{\underline{\underline{MD}} - 2}$$

$$\sigma d\mathbf{h}_i := \sqrt{\frac{\sum_{j=3}^{\underline{\underline{MD}}} (H_{i,j} - d\mathbf{h}_i)^2}{\underline{\underline{MD}} - 3}}$$

read data Dual dark

$\underline{\underline{DD}} := \text{READPRN}("Dark608.txt")$ $\underline{\underline{\sigma DD}} := \text{READPRN}("DarkDisp608.txt")$

$\underline{\underline{DDD}} := \underline{\underline{DD}}^T$ $\underline{\underline{N}} := \text{cols}(\underline{\underline{DD}}) - 2$ 607 $\underline{\underline{\sigma DDD}} := \underline{\underline{\sigma DD}}^T$

$\underline{\underline{i}} := 0 .. \underline{\underline{N}}$

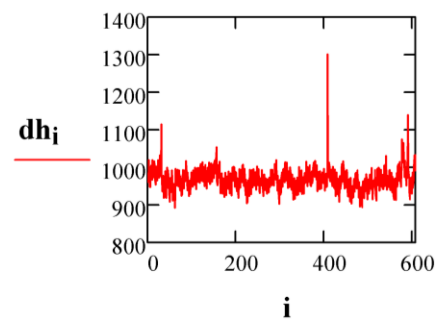
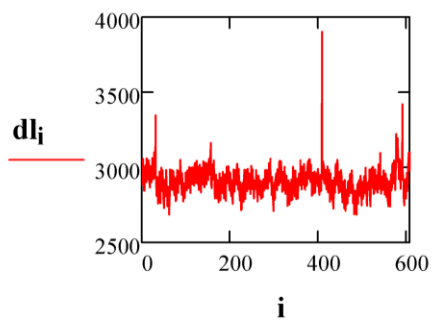
$\underline{\underline{DL}}_i := \underline{\underline{DDD}}_{i+1}$ $\underline{\underline{\sigma DL}}_i := \underline{\underline{\sigma DDD}}_{i+1}$

$\underline{\underline{DL}}^T$	0	1	2	3	4	5	6
0	2953.84	2884.44	2908.58	3057.4	2953.05	2844.07	...

$d\mathbf{l}^T$	0	1	2	3	4	5	6
0	2953.86	2884.6	2908.7	3057.6	2953.05	2843.93	...

$d\mathbf{h}^T$	0	1	2	3	4	5	6
0	984.91	961	969.93	1019.6	983.81	947.86	...

σ_{DL}^T		0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0.89	1.13	1.19	0.86	1.04	1.21	1.33	0.97	...
σ_{dl}^T		0	1	2	3	4	5	6	7	
	0	5.82	7.34	7.76	5.62	6.85	7.95	8.76	...	
σ_{dh}^T		0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	3.3	3.23	2.67	2.84	2.57	3.07	2.61	2.34	...



air data processing after black calibration

b and B - black calibration

$M1 := 730$ $M2 := 1360$ $i := 0 .. N$ $MM := M2 - M1$

$j := 0 .. MM$

$$b_{li} := \frac{\sum_{j=M1}^{M2} (L_{i,j} - dl_i)}{MM + 1}$$

$$\sigma_{bli} := \sqrt{\frac{\sum_{j=M1}^{M2} (L_{i,j} - dl_i - b_{li})^2}{MM}}$$

$$b_{hi} := \frac{\sum_{j=M1}^{M2} (H_{i,j} - dh_i)}{MM + 1}$$

$$\sigma_{bhi} := \sqrt{\frac{\sum_{j=M1}^{M2} (H_{i,j} - dh_i - b_{hi})^2}{MM}}$$

read data Dual Low+High mean and σ

BLL := READPRN("Low608.txt") **σ BLL** := READPRN("LowDisp608.txt")

BHH := READPRN("High608.txt") **σ BHH** := READPRN("HighDisp608.txt")

N := cols(**BLL**) - 2 607

BLLL := **BLL**^T **σ BLLL** := **σ BLL**^T

BHHH := **BHH**^T **σ BHHH** := **σ BHH**^T

i := 0 .. **N**

BL_{**i**} := **BLLL**_{**i**+1} **σ BL**_{**i**} := **σ BLLL**_{**i**+1}

BH_{**i**} := **BHHH**_{**i**+1} **σ BH**_{**i**} := **σ BHHH**_{**i**+1}

BL ^T		0	1	2	3	4	5	6	7
0	3900.9	4775.5	4852	5537.2	6736.1	6813.5	6656.8	...	

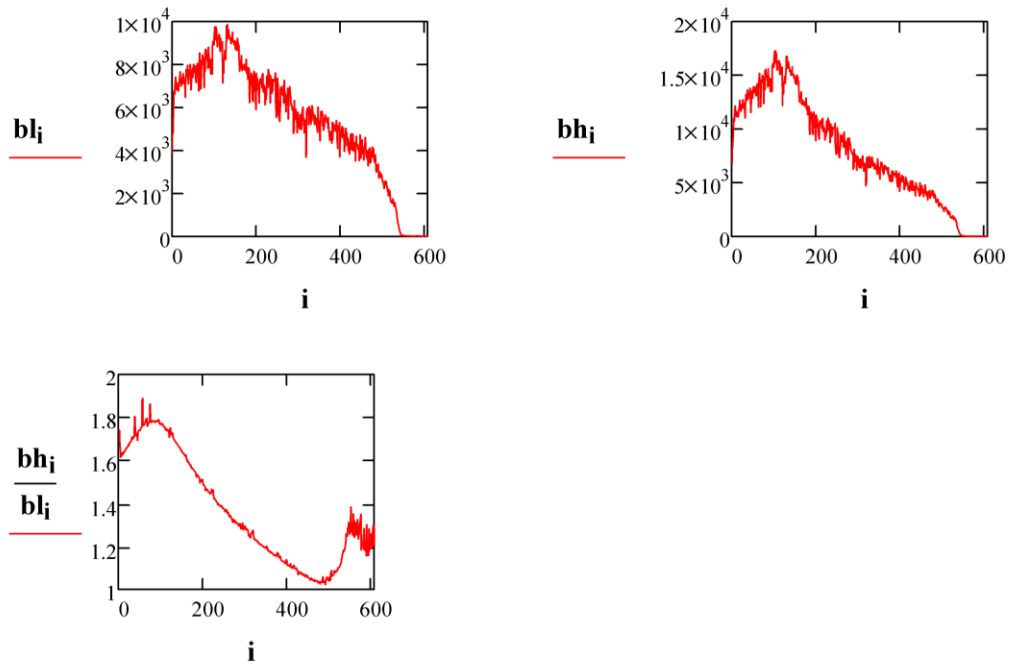
bl ^T		0	1	2	3	4	5	6	7
0	3880.9	4751.3	4828.4	5510.2	6703.1	6780.7	6623.4	...	

bh ^T		0	1	2	3	4	5	6
0	6771.9	8222.3	8394.2	9280.9	11005.2	10950.6	...	

σBL ^T		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	10.1	12.5	12.6	14.1	17	17.1	17	18.2	19.1	...	

σbl ^T		0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	273.6	338.3	340.8	385.5	465.3	466.8	463.9	495.7	...	

σbh ^T		0	1	2	3	4	5	6	7
0	493.5	588.4	597.4	654	764.2	762.7	758.6	...	



Determination of the level of fluctuation of radiation from pulse to pulse

$i := 0..N - 1$ $k := 0$

k any from 0 to ...

$$\delta l \alpha_i := \sqrt{\frac{\sum_{j=M1}^{M2} [(L_{i+1, j-dl_{i+1}-bl_{i+1}}) \cdot (L_{k, j-dl_k-bl_k})]}{bl_k \cdot bl_{i+1}}}$$

$$\delta h \alpha_i := \sqrt{\frac{\sum_{j=M1}^{M2} [(H_{i+1, j-dh_{i+1}-bh_{i+1}}) \cdot (H_{k, j-dh_k-bh_k})]}{bh_k \cdot bh_{i+1}}}$$

$\delta LL\alpha := \text{READPRN}(\text{"LowFluc608.txt"})$ $\delta HH\alpha := \text{READPRN}(\text{"HighFluc608.txt"})$

$\underline{N} := \text{cols}(\delta LL\alpha) - 2 \quad 607$

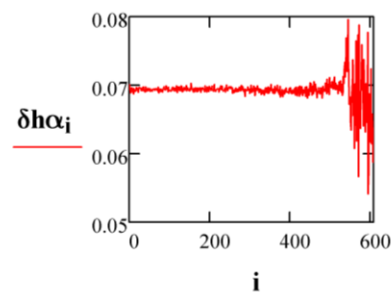
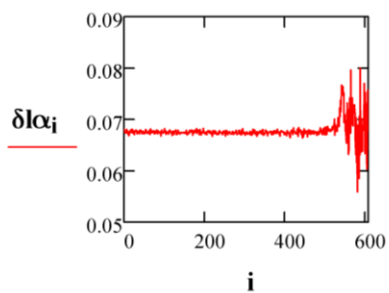
$\delta LLL\alpha := \delta LL\alpha^T$ $\delta HHH\alpha := \delta HH\alpha^T$ $i := 0 \dots N - 2$

$\delta L\alpha_i := \delta LLL\alpha_{i+2}$ $\delta H\alpha_i := \delta HHH\alpha_{i+2}$

$\delta\alpha^T$	0	1	2	3	4	5	6	7	
0	0.0682	0.0677	0.0674	0.0674	0.0675	0.0678	0.0681	...	

$\delta L\alpha^T$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$\delta h\alpha^T$	0	1	2	3	4	5	6	7	
0	0.0701	0.0694	0.0696	0.0689	0.0691	0.0696	0.0697	...	



normalization to the reference channel

$\underline{k} := 3$ $N \quad 607$

$i := 0 \dots N - 4$ $j := 0 \dots MM$

$$rll_{i,j} := \frac{L_{i+k+1,j+M1} - dl_{i+k+1}}{L_{k,j+M1} - dl_k} \quad rhh_{i,j} := \frac{H_{i+k+1,j+M1} - dh_{i+k+1}}{H_{k,j+M1} - dh_k}$$

$$i := 0..N-4$$

$$rl_i := \frac{\sum_{j=0}^{MM} rll_{i,j}}{MM+1} \quad \sigma rl_i := \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{MM} (rll_{i,j} - rl_i)^2}{MM}}$$

$$rh_i := \frac{\sum_{j=0}^{MM} rhh_{i,j}}{MM+1} \quad \sigma rh_i := \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{MM} (rhh_{i,j} - rh_i)^2}{MM}}$$

$$rl^T$$

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1.2168	1.231	1.2023	1.2824	1.3488	1.2485	1.2388	...

$$rh^T$$

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1.1862	1.1803	1.1596	1.2341	1.31	1.2068	1.2041	...

$$\sigma rl^T$$

	0	1	2	3	4
0	0.0271	0.0276	0.0279	0.0286	...

$$\sigma rh^T$$

	0	1	2	3	4
0	0.0249	0.0259	0.0244	0.0261	...

N0 := 560

i := 0 .. **N0**

k := 0

$$\sigma_{2rl\alpha_i} := \frac{\sum_{j=0}^{MM} [(rll_{i+1,j} - rl_{i+1}) \cdot (rll_{k,j} - rl_k)]}{MM}$$

$$\sigma_{2rh\alpha_i} := \frac{\sum_{j=0}^{MM} [(rhh_{i+1,j} - rh_{i+1}) \cdot (rhh_{k,j} - rh_k)]}{MM}$$

$$\delta_{rl\alpha_i} := \begin{cases} \sqrt{\frac{\sigma_{2rl\alpha_i}}{rl_k \cdot rl_{i+1}}} & \text{if } \frac{\sigma_{2rl\alpha_i}}{rl_k \cdot rl_{i+1}} \geq 0 \\ \text{"independence"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\delta_{rh\alpha_i} := \begin{cases} \sqrt{\frac{\sigma_{2rh\alpha_i}}{rh_k \cdot rh_{i+1}}} & \text{if } \frac{\sigma_{2rh\alpha_i}}{rh_k \cdot rh_{i+1}} \geq 0 \\ \text{"independence"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

RLL := READPRN("LowRFluc608.txt") **RHH** := READPRN("HighRFluc608.txt")

N := cols(**RLL**) - 3 606

RLLL := **RLL**^T **RHHH** := **RHH**^T **i** := 0 .. **N0**

RL_{**i**} := **RLLL**_{**i+3**} **RH**_{**i**} := **RHHH**_{**i+3**}

$$RL^T$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...

$$\delta r_l \alpha^T$$

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0.0175	0.016	0.0168	0.0166	0.0165	0.0156	0.0166	...

$$RH^T$$

	0	1	2	3	4	5
0	$-8.8 \cdot 10^{-5}$	$-3.6 \cdot 10^{-5}$	$-6.7 \cdot 10^{-8}$	$-4 \cdot 10^{-8}$	$-4 \cdot 10^{-8}$...

$$\delta r_h \alpha^T$$

	0	1	2	3
0	0.0169	0.0149	0.0151	...

