

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки код «приборостроение»
Отделение контроля и диагностики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Выбор и оценка параметров системы цифровой радиографии цилиндрических объектов

УДК 620.179.152:004.353:62-222

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
151651	Цзян Шань		

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
Доцент	Фадеева Вера Николаевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор Отделения общетехнических дисциплин	Панин Владимир Филиппович	д.т.н., профессор		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Мойзес Борис Борисович	К.Т.Н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	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	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10;. ОК-3,9; ПК-2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11.12, 13, 14, 15, 16,17, 18), Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р2	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	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК-7; ПК-8,9,10, 11, 12, 13-18) Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств 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	Требования ФГОС (ОК-9, ОПК-3; ППК-14, 15, 16). Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
Р4	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	Требования ФГОС (ОК-3,ОК-6, ОПК-2, 3,4, 5, 6, 7,8,9, ПК-1,2,9,14). Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе	Требования ФГОС (ОК-5, ОК-6 ОПК-2, 3,4,5,6; ПК-1,2,3,4). Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности;	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-6,8,14,17), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
	уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции	требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
	<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-17), Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, ОПК-2), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду	Требования ФГОС (ОК-2, 4, 8, 9,10; ОПК-9) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки код «приборостроение»
 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
151651	Цзян шань

Тема работы:

Совершенствование метода дуальных энергий на основе выбора металлических фильтров	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	
Срок сдачи студентом выполненной работы:	

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования – системы цифровой радиографии. Предмет исследования – методы математического и имитационного моделирования систем цифровой радиографии применительно к контролю цилиндрических объектов. Цель работы разработать математическую модель, алгоритм и программу для имитационного моделирования цифровых радиографических изображений цилиндрических объектов для научного обоснования технической реализуемости задачи контроля.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	разработать математическую модель формирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля; трансформировать разработанную математическую модель в алгоритм имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля; реализовать предложенный алгоритм имитационного моделирования в программу, позволяющую численно моделировать цифровые радиографические изображения (проекции в КТ) цилиндрических объектов контроля; провести ряд вычислительных экспериментов для

	иллюстрации работоспособности предлагаемых модели, алгоритма и программы применительно задаче проектирования систем цифровой радиографии и компьютерной томографии, предназначенных для контроля крупногабаритных труб.
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
151651	Цзян Шань		

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

Студенту:

Группа	ФИО
151651	Цзян шань

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Приборостроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	-Проект выполняется в Российско-китайской научной лаборатории радиационного контроля и досмотра -Приблизительная сумма затрат на выполнение проекта составляет 35000000 -В реализации проекта задействованы 2 человека руководитель проекта, студент-дипломни
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	-Данная НИР новая, следовательно нормы и нормативы расходования ресурсов отсутствуют -Минимальный размер оплаты труда (на 2019 год) составляет 7500 руб
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	-Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данная НИР не подлежит налогообложению - Отчисления во внебюджетные фонды – 30 % от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения исследовательской работы	-Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы - SWOT-анализ
2. Планирование процесса управления НИР: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	-Планирование работ по научно-техническому исследованию;
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	- Оценка научно-технического уровня следования, - Оценка рисков

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НИР
2. Матрица SWOT
Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИР

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фадеева Вера Николаевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
151651	Цзян Шань		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
151651	Цзян шань

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Совершенствование методов математического и имитационного моделирования систем цифровой радиографии применительно к контролю цилиндрических объектов.. 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	Повышенный уровень электромагнитного и ионизирующего излучения Отклонение показателей микроклимата Поражение электрическим током
2. Экологическая безопасность:	Воздействие на литосферу. Вероятность радиационного заражения
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Разрушение здания. Пожары.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор Отделения общетехнических дисциплин	Панин Владимир Филиппович	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
151651	Цзян Шань		

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

Институт неразрушающего контроля
 Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение
 Уровень образования Бакалавриат
 Кафедра физических методов и приборов контроля качества
 Период выполнения осенний / весенний_семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела / вид работы	Максимальный балл раздела
10.04.2019	Математическая модель формирования цифровых радиографических изображений в цифровой радиографии и проекций в компьютерной томографии	10
17.04.2019	Примеры имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций) крупногабаритных труб	10
25.04.2019	Оценка распределения плотности по сечению трубы	20
28.04.2019	О технической реализуемости методов цифровой радиографии и компьютерной томографии применительно к контролю крупногабаритных труб	20
10.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
20.05.2019	Социальная ответственность	20

Составил преподаватель:

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

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 94 страниц, 10 рисунков, 25 таблиц, 78 источников, 1 приложения, одной презентации.

Ключевые слова: цилиндрические объекты, рентгеновское излучение; регистраторы рентгеновского излучения, цифровая радиография, математические модели, плотность, эффективный атомный номер, толщина, массовая толщина.

Объект исследования – системы цифровой радиографии.

Предмет исследования – методы математического и имитационного моделирования систем цифровой радиографии применительно к контролю цилиндрических объектов.

Цель работы – разработать математическую модель, алгоритм и программу для имитационного моделирования цифровых радиографических изображений цилиндрических объектов для научного обоснования технической реализуемости задачи контроля.

Разработана математическая модель, алгоритм и программу для имитационного моделирования цифровых радиографических изображений цилиндрических объектов для научного обоснования технической реализуемости задачи контроля. Математическая модель учитывает основные параметры источника и регистратора рентгеновского излучения, схемы формирования цифровых радиографических изображений. Методом численного моделирования исследовано влияние основных параметров системы цифровой радиографии на качество контроля для некоторых типовых объектов.

Степень внедрения: результаты исследований реализованы в виде алгоритма и программы моделирования цифровых радиографических изображений, используемых для выбора и оценки параметров систем цифровой радиографии цилиндрических объектов, характерных для нефтегазового комплекса, и используются в учебном процессе для написания курсовых работ, проектов и выпускных квалификационных работ.

Область применения: цифровая радиография цилиндрических объектов.

Экономическая эффективность и практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанных алгоритма и программы оценки реализуемости задачи проектирования систем цифровой радиографии применительно к контролю цилиндрических объектов.

Сокращения и обозначения

Сокращения

НМК – неразрушающие методы контроля

ЦР – цифровая радиография

РВТ – рентгеновская вычислительная томография

ОК – объект контроля

ИРИ – источник рентгеновского излучения

ИТИ – источник тормозного излучения

РРИ – регистратор рентгеновского излучения

РТИ – регистратор тормозного излучения

РОП – радиационно-оптический преобразователь

ПР – пространственное разрешение

ЭР – эффективность регистрации

РК – радиационный контраст

ФП – фотопреобразователь (фотоприёмник)

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ОСШ – отношение сигнал/шум

ПК – производительность контроля

МКО – массовый коэффициент ослабления излучения

ЛКО – линейный коэффициент ослабления излучения

Обозначения

E_{max} – максимальная энергия рентгеновского излучения, кэВ

E – энергия рентгеновского фотона

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

F – фокусное расстояние

k_x – радиационный контраст

SNR – отношение сигнал/шум

ρ – плотность материала

H – толщина ОК

ρH – массовая толщина ОК

m – МКО материала ОК

r_x – пространственное разрешение

h_d – толщина РОП

μ – ЛКО излучения материалом РОП

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

Нормативные документы

1. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий, соединения сварные, радиографический метод. – М.: Стандартинформ, 2008. –19 с.
2. ГОСТ 17038.–79. Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Метод измерения спектрометрической постоянной фотоэлектронного умножителя, используемого для определения сцинтилляционных параметров детекторов.
3. ОАО «Газпром» Стандарт Организации «Газораспределительные системы. Методика проведения рентгенографического контроля сварных соединений стальных газопроводов с применением метода цифровой рентгенографии», СТО Газпром 2-2.3-561-2011.
4. ISO 14096-1-2005. Non-destructive testing –Qualification of radiographic film digitisation systems –Part 1: Definitions,quantitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control.
5. ISO 14096-2-2005. Non-destructive testing –Qualification of radiographic film digitisation systems –Part 2: Minimum requirements.
6. EN 14096-1: 2003-08-00 Non-destructive testing –Qualification of radiographic film digitisation systems –Part 1: Definitions, quantitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control; German version EN 14096-1:2003 S-16-188.
7. EN 14096-:2003-08-00 Non-destructive testing –Qualification of radiographic film digitisation systems –Part 2: Minimum requirements; German version EN 14096-2:2003 S-16-189.
8. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. – М.: Стандартинформ, 2007. –16 с.
9. Международный стандарт ISO/FDIS17636-2 Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part2: X-and gamma-ray techniques with digital detectors. 2013-01-15.
10. ГОСТ ISO 17636-1-2017 Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 1. Способы рентгено- и

гаммаграфического контроля с применением пленки. – Стандартиформ, 2018.
– 36 с.

11. ГОСТ ISO 17636-2-2017 Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 2. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов. – Стандартиформ, 2018. – 54 с.

Оглавление

Введение.....	16
1 Обзор литературы	21
2 Математическая модель формирования цифровых радиографических изображений в цифровой радиографии и проекций в компьютерной томографии	25
2.1 Основные параметры систем цифровой радиографии и компьютерной томографии	25
2.2 Геометрическая схема формирования цифровых радиографических изображений и проекций в системах ЦР, СРЦР и КТ для веерного узкого пучка рентгеновского (тормозного) излучения	28
2.3 Расчёт распределения толщины объекта контроля по стали по линейке детекторов.....	30
2.4 Математическая модель формирования единичной строки радиографического изображения	31
2.5 Коррекция немоноэнергетичности в цифровой радиографии и компьютерной томографии.....	34
2.6 Согласование диапазонов изменения аналоговых и цифровых сигналов	36
3 Примеры имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций) крупногабаритных труб	37
4. Оценка распределения плотности по сечению трубы.....	41
5 О технической реализуемости методов цифровой радиографии и компьютерной томографии применительно к контролю крупногабаритных труб	43
5.1 Методика расчёта времени сканирования	43
5.2 Выбор разрядности АЦП.....	44
5.3 Пример расчёта времени сканирования и разрядности АЦП.....	44
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	46
6.1 Техничко-экономическое обоснование НИР	46
6.2 Планирование работ по научно-техническому исследованию	49
6.2.1 Определение трудоемкости этапов НИР	51
6.2.2 Техническая готовность темы.....	52
6.2.3 Построение графика работ	54
6.2.4 Смета затрат на разработку проекта	55

6.3 Оценка целесообразности исследования	59
6.3.1 Оценка научно-технического уровня следования	59
6.3.2 Оценка возможных рисков.....	60
7 Социальная ответственность	63
7.1 Производственная безопасность.....	63
7.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	63
7.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	64
7.2.1 Воздействие неионизирующих излучений	64
7.2.2 Электрический ток	65
7.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны	66
7.2.4 Отклонение показателей микроклимата от нормальных	67
7.2.5 Повышенный уровень шумов	67
7.2.6 Повышенный уровень ионизирующего излучения	68
7.3 Экологическая безопасность.....	71
7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	72
7.5 Разрушение зданий и/или сооружений	72
7.6 Пожарная безопасность	72
7.7 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	73
7.7.1 Организационные мероприятия.....	73
7.7.2 Организация рабочей зоны	74
Заключение	76
Список использованных источников	77
Приложение	85

Введение

Цифровая радиография в настоящее время является одним из наиболее востребованных методов испытания разнообразных объектов в машиностроении, приборостроении, транспортном строительстве. Появление на рынке научного оборудования новых эффективных источников и регистраторов рентгеновского излучения подстёгивает интерес к исследованиям, связанным с разработкой систем цифровой радиографии (СЦР) применительно к исследованию объектов, которые ранее считались не пригодными к контролю. Подчеркнём некоторые наиболее важные тенденции в развитии источников рентгеновского излучения (ИРИ) и регистраторов рентгеновского излучения (РРИ). К этим тенденциям относится расширение диапазонов максимальных энергий ИРИ от первых десятков кэВ до десяти МэВ и более. В последние годы увеличилось количество публикаций, посвящённых возобновлению применения бетатронов и линейных ускорителей электронов с максимальной энергией, превышающих 10 МэВ, в системах цифровой радиографии крупногабаритных объектов. Напомним, что рентгеновское излучение с максимальной энергией свыше 1 МэВ в России и ряде других стран называют тормозным излучением, а соответствующие источники – источниками тормозного излучения (ИТИ). Подчеркнём, что принципиального отличия между ИРИ и ИТИ не существует – и то и другое излучение образуется в результате торможения ускоренных электронов в материале мишени. Вторая тенденция в развитии ИРИ (ИТИ) связана с уменьшением размера излучающего пятна и с повышением интенсивности излучения. Следует также отметить тенденцию повышения частоты импульсов в импульсных источниках рентгеновского (тормозного) излучения. Главной тенденцией в развитии РРИ и РТИ безусловно является расширение их номенклатуры за счёт регистраторов прямого преобразования (РПП), качество которых и их функциональные возможности радикально улучшились буквально за последние пять лет. Комбинированные РРИ также претерпели

существенные изменения за счёт применения новых сцинтилляционных кристаллов и сцинтилляционной керамики. Успехи в развитии источников и регистраторов сопровождаются бурным развитием точной механики и робототехники.

Первым этапом проектирования СЦР является проверка и обоснование реализуемости задачи проектирования. Этап проверки и обоснования реализуемости сводится к выбору и оценке параметров проектируемой системы цифровой радиографии и сопоставлению совокупности полученных значений техническому заданию на проектирование заказчика. Возможны два принципиально отличающихся друг от друга подхода к начальному этапу проектирования СЦР. Первый подход базируется на методе аналогий и связан с ресурсами организации проектировщика, то есть наличием работоспособных СЦР, позволяющих контролировать объекты, схожие с предполагаемыми ОК. Отметим, что чисто экспериментальный подход изначально не рассматривается, так как требует огромных материальных затрат и чреват многочисленными ошибками. Второй подход основан на глубоком понимании особенностей процессов переноса и регистрации рентгеновского (тормозного) излучения, формирования цифровых радиографических изображений применительно к рассматриваемому типу объектов контроля. Второй подход сводится к разработке адаптированных математических моделей СЦР, алгоритмов имитационного моделирования и реализующих их программ. Такой подход позволяет получать реалистичные цифровые радиографические изображения предполагаемых объектов контроля, что существенно облегчает диалог проектировщика (изготовителя) систем СЦР с заказчиком.

Важным классом объектов контроля являются цилиндрические объекты, имеющие стратегическое значение в различных отраслях экономики современной России и многих стран мира.

Сказанное выше подтверждает актуальность темы выпускной квалификационной работы и её практическую значимость.

Объект исследований – системы цифровой радиографии.

Предмет диссертационных исследований – методы математического и имитационного моделирования систем цифровой радиографии (систем КТ) применительно к контролю цилиндрических объектов.

Цель исследований – разработать необходимые для научного обоснования технической реализуемости задач проектирования математическую модель, алгоритм и программу для имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

- разработать математическую модель формирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля;

- трансформировать разработанную математическую модель в алгоритм имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля;

- реализовать предложенный алгоритм имитационного моделирования в программу, позволяющую численно моделировать цифровые радиографические изображения (проекции в КТ) цилиндрических объектов контроля;

- провести ряд вычислительных экспериментов для иллюстрации работоспособности предлагаемых модели, алгоритма и программы применительно задаче проектирования систем цифровой радиографии и компьютерной томографии, предназначенных для контроля крупногабаритных труб.

Методы исследования. Для решения поставленных выше задач использовались вычислительные методы, методы математического и численного моделирования; методы системного анализа и обработки изображений; методы планирования численных и натурных экспериментов;

методы статистической обработки результатов экспериментов, включая линейный и нелинейный регрессионный анализ.

Научная новизна:

– разработана математическая модель формирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля;

– трансформирована разработанная математическая модель в алгоритм имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля;

– реализован предложенный алгоритм имитационного моделирования в программу, позволяющую численно моделировать цифровые радиографические изображения (проекции в КТ) цилиндрических объектов контроля;

– проведён ряд вычислительных экспериментов для иллюстрации работоспособности предлагаемых модели, алгоритма и программы применительно задаче проектирования систем цифровой радиографии и компьютерной томографии, предназначенных для контроля крупногабаритных труб.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в результате проведенных исследований математическая модель, алгоритм имитационного моделирования и программа позволяют проводить вычислительные эксперименты с целью научного обоснования реализуемости задачи проектирования систем цифровой радиографии цилиндрических объектов.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных исследований реализованы в математической модели формирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов, а также в алгоритме и реализующей его программе для вычислительных экспериментов по оценке возможности реализации предлагаемой задачи

проектирования систем цифровой радиографии (систем компьютерной томографии).

Апробация работы. Основные положения выпускной квалификационной работы обсуждались на отчетах по УИРС отделения контроля и диагностики ИШ НКБ в 2018 – 2019 годах.

На защиту выносятся:

- математическая модель формирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля;
- алгоритм имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля;
- программа для численного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля;
- результаты вычислительных экспериментов для иллюстрации работоспособности предлагаемых модели, алгоритма и программы применительно задаче проектирования систем цифровой радиографии и компьютерной томографии, предназначенных для контроля крупногабаритных труб.

1 Обзор литературы

В медицине и во многих отраслях промышленности, строительства, транспорта широко используются объекты, которые в большей или меньшей степени можно считать цилиндрическими объектами или объединением цилиндрических фрагментов [1–5]. Системы цифровой радиографии широко применяются для контроля разнообразных объектов [6–8], в том числе и цилиндрических объектов. В последние годы наблюдается бурный рост разработок, связанных с контролем ОК методами ЦР и КТ. Во введении отмечено, что современное развитие радиационных методов контроля напрямую связано с совершенствованием ИРИ (ИТИ) и РРИ (РТИ). Среди статей, посвящённых высокоэнергетическим ИТИ, можно отметить [9]. Развитие систем РРИ (РТИ) связано с вхождением на рынок перспективных материалов РЧП [10].

Следует отметить, что важное место среди всех ОК, имеющих цилиндрическую форму, занимают объекты, относящиеся к нефтяному и газовому сектору экономики России. Нефть и газ продолжают оставаться основными энергетическими ресурсами современного мира в целом и России в частности [11, 12]. Основную нагрузку по бесперебойной транспортировке нефти и газа от промыслов до конечного потребителя несут на себе соответствующие магистральные трубопроводы. Важную роль в обеспечении безопасности, долговечности и безотказности трубопроводов играют различные реализации неразрушающих методов контроля (НМК) [13–16]. Ниже в качестве основного типа цилиндрических объектов будут рассматриваться крупногабаритные трубы (сварные швы труб) магистральных нефтепроводов и газопроводов.

К числу наиболее востребованных и эффективных НМК элементов трубопроводного транспорта, выступающих в качестве объектов контроля (ОК), относятся методы [17–21], основанные на оценке возмущений, вносимых объектом, в поля гамма- рентгеновского или тормозного излучения и

дальнейшем обнаружении дефектов или измерении параметров ОК. Методы плёночной и цифровой радиографии (ЦР) широко применяются для контроля сварных швов трубопроводов [22–24], но не в полной мере устраивают конечного потребителя, так как большая часть методик формирования радиографических изображений не позволяет локализовать дефекты, идентифицировать их, оценить локальную толщину трубы и т.п. Указанные задачи могут быть решены, например, методами, основанными на специальных реализациях ЦР, и методами компьютерной томографии (КТ) [25–27]. К специальным реализациям ЦР (СРЦР) относится, например, стереорадиография или радиография с большим количеством ракурсов. Особенности применения методов СРЦР и КТ для исследования труб магистральных трубопроводов [28, 29] связаны с характерной для них значительностью диаметров (до 1420 мм) и толщин труб (до 50 мм). При проектировании систем СРЦР и КТ для контроля труб крупногабаритных трубопроводов целесообразно использовать подход, основанный на математическом и имитационном моделировании таких систем. Основой математических моделей систем СРЦР и КТ являются математические модели формирования цифровых радиографических изображений (проекций). Предпочтение математического и имитационного моделирования при проектировании систем СРЦР и КТ перед натурными экспериментами с вариацией параметров ИРИ (ИТИ) и РРИ (РТИ) обусловлено высокими затратами последних и отсутствием реальной гарантии достижимости задачи проектирования соответствующих систем. Проектирование систем СРЦР и КТ сводится к выбору параметров источника рентгеновского (тормозного) и регистратора рентгеновского (тормозного) излучения, а также параметров схемы сканирования. Отмеченный выбор базируется на определении методом имитационного моделирования совокупности всех параметров системы, которые реализуют задачи проектирования. Отсюда следует вывод о необходимости разработки специализированных математической и имитационной моделей систем СРЦР и КТ применительно к контролю крупногабаритных труб. В работах [30–34]

отмечено, что качество исходных цифровых радиографических изображений и проекций и полнота их набора определяют качество изображений в СРЦР и КТ. Следует отметить, что цифровое радиографическое изображение совпадает с единичной проекцией в трёхмерной реализации КТ.

Качество исходных цифровых радиографических изображений в СРЦР и проекций в КТ определяется их близостью к некоторой идеальной модели, характеризуемой следующими требованиями:

- энергетический спектр источника излучения близок к δ -функция;
- геометрия узкого пучка, на практике широкий пучок ограничивается щелевыми коллиматорами;
- отсутствие влияния сигналов с каналов детектора друг на друга, на практике достигается оптической и радиационной изоляцией единичных каналов РРИ (РТИ);
- отсутствие послесвечения (минимальный уровень), на практике снижение уровня послесвечения достигается специальным выбором материала радиационно-чувствительного преобразователя;
- низкие уровни шумов, на практике достигается увеличением толщины, плотности, эффективного атомного номера РЧП, высокой загрузкой единичного канала РРИ (РТИ).

Из сказанного выше вытекает актуальность темы выпускной квалификационной работы, целью которой является разработка необходимых для научного обоснования технической реализуемости задач проектирования математическую модель, алгоритм и программу для имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

- разработать математическую модель формирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля;

– трансформировать разработанную математическую модель в алгоритм имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций в КТ) цилиндрических объектов контроля;

– реализовать предложенный алгоритм имитационного моделирования в программу, позволяющую численно моделировать цифровые радиографические изображения (проекции в КТ) цилиндрических объектов контроля;

– провести ряд вычислительных экспериментов для иллюстрации работоспособности предлагаемых модели, алгоритма и программы применительно задаче проектирования систем цифровой радиографии и компьютерной томографии, предназначенных для контроля крупногабаритных труб.

2 Математическая модель формирования цифровых радиографических изображений в цифровой радиографии и проекций в компьютерной томографии

2.1 Основные параметры систем цифровой радиографии и компьютерной томографии

Всю совокупность основных параметров систем ЦР, СРЦР и КТ можно разделить на четыре группы, связанные с источником рентгеновского (тормозного) излучения, с единичными детекторами многоканального регистратора рентгеновского (тормозного) излучения, с объектом контроля и с геометрической схемой формирования цифровых радиографических изображений (проекций в компьютерной томографии). В настоящее время наиболее применимыми являются комбинированные регистраторы (КР) – радиационно-чувствительный преобразователь (РЧП) + фотоприёмник (ФП) и регистраторы прямого преобразования (РПП). В качестве РЧП в КР используются отдельные сцинтилляционные монокристаллы, сцинтилляционные моно- и поликристаллические экраны. В РЧП КР поглощённая энергия ионизирующего излучения превращается в энергию светового излучения, которое трансформируется в ФП в электрическую энергию. Поликристаллические экраны изготавливаются из растёртых в порошок сцинтилляционных монокристаллов или сцинтилляционной керамики. Чувствительные элементы РПП изготавливаются из полупроводниковых материалов – кремний, арсенид галлия, теллурид кадмия и т.п. В РЧП поглощённая энергия ионизирующего излучения трансформируется в электрическую энергию. Для любых типов регистраторов рентгеновского (тормозного) излучения аналоговый сигнал (АС) поступает на вход АЦП, на выходе которого формируется цифровой сигнал (ЦС). Отметим, что источники рентгеновского излучения отличаются по режиму излучения – непрерывный режим (НР ИРИ) и импульсный режим (ИмР ИРИ (ИТИ)). Регистраторы рентгеновского излучения также отличаются по режиму регистрации – счётный

режим регистрации (СРР РРИ) и интегральный режим регистрации (ИнРР РРИ (РТИ)). Следует заметить, что на рынке РРИ появились регистраторы с высоким временным разрешением, позволяющим их использование для регистрации импульсного рентгеновского излучения в СРР. Упомянутое в разделе 1 существенное отличие энергетических спектров от δ -функции частично компенсируется введением предварительного фильтра.

Источник рентгеновского (тормозного) излучения:

– режим излучения – НР для ИРИ или ИмР для ИРИ и ИТИ;

– максимальная энергия – E_{\max} ;

– половинный угол раскрытия пучка излучения – φ_{\max} ;

– энергетический спектр – $f(E, E_{\max})$, эквивалентное понятие – плотность распределения случайной величины (СВ) энергии – $\frac{\partial N(E, E_{\max})}{\partial E}$, формула связи

$$\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) dE = \int_0^{E_{\max}} \frac{\partial N(E, E_{\max})}{\partial E} dE = 1; \quad (1)$$

– толщина предварительного фильтра, плотность и эффективный атомный номер его материала – h_f, ρ_f, Z_f .

Регистратор рентгеновского (тормозного) излучения:

– режим регистрации – СРР для РРИ или ИнРР для РРИ или для РТИ;

– вид РРИ (РТИ) – линейный (полосковый) или матричный (панельный);

– размер РРИ (РТИ) в пикселях – $M \times N$, для линейного (полоскового) регистратора $M=1$;

– толщина, плотность и эффективный атомный номер материала РЧП – h_d, ρ_d, Z_d ;

– размеры фотоприёмника (КР) или размеры РЧП (РПП) – a_d, b_d ;

– разрядность аналого-цифрового преобразователя – k_{ADC} ;

– количество фотонов, падающих за время регистрации на фронтальную поверхность единичного РЧП для РПП или на часть фронтальной поверхности КД, соответствующей единичному ФП, – N_0 .

Отметим, что параметр N_0 является комплексным, поэтому одновременно характеризует источник и регистратор рентгеновского (тормозного) излучения, геометрическую схему формирования цифровых радиографических изображений в системах ЦР, СРЦР и КТ и в опосредованном виде объект контроля.

Объект контроля (труба):

– диаметр трубы – D ;

– марка стали, плотность и поэлементный состав с массовой долей – ρ_s , $(Z_i, \alpha_i), i=1 \dots n$;

– толщина стали – H .

Геометрическая схема контроля:

– расстояние от центра излучающей поверхности ИРИ (ИТИ) до центра РРИ (РТИ) – F ;

– угол между осью пучка излучения и касательной к цилиндрической поверхности в плоскости, перпендикулярной оси ОК, – φ_0 , для угла φ_0 должно соблюдаться условие

$$\varphi_0 < \varphi_{\max}; \quad (2)$$

– расстояние от объекта контроля до РРИ (РТИ) – A .

Отметим, что для некоторых объектов контроля условие полного перекрытия регистратором тени ОК является невыполнимым. В этой ситуации итоговые цифровые радиографические изображения (проекции в КТ) являются объединением нескольких изображений (проекций). Количество таких промежуточных изображений – дополнительный параметр.

Введённые параметры геометрической схемы формирования цифровых радиографических изображений в системах ЦР, СРЦР и КТ нуждаются в подробном разъяснении и иллюстрации.

2.2 Геометрическая схема формирования цифровых радиографических изображений и проекций в системах ЦР, СРЦР и КТ для веерного узкого пучка рентгеновского (тормозного) излучения

Для рассматриваемого случая единственно приемлемым вариантом регистратора является линейный либо протяжённый узкий регистратор. Линейный регистратор рентгеновского излучения является представителем класса протяжённых узких регистраторов. Поэтому ниже все протяжённые регистраторы будем называть линейными регистраторами.

Будем считать, что линейка детекторов полностью перекрывает тень ОК. Объект контроля в идеализированном случае является телом вращения. Рассмотрим модель формирования цифрового радиографического изображения (единичной проекции) для веерного узкого пучка рентгеновского (тормозного) излучения.

На рисунке 1 приведена геометрическая схема формирования одной строки цифрового радиографического изображения в различных реализациях ЦР (единичной проекции в КТ).

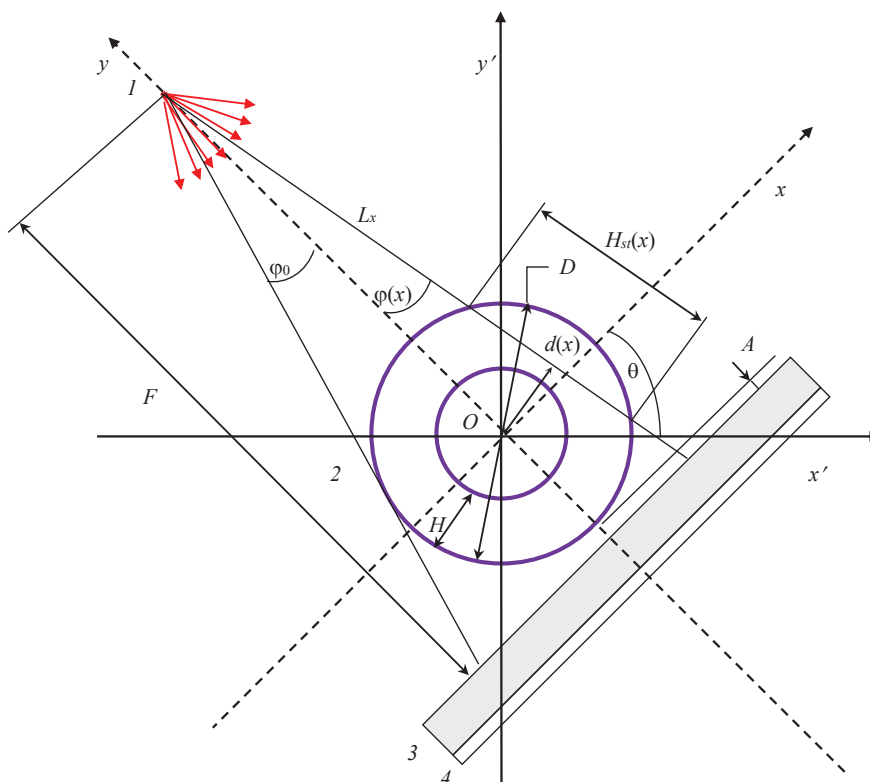


Рисунок 1 – Схема формирования строки цифрового радиографического изображения:
1 — ИТИ; 2 — ОК; 3 — РЧП; 4 — ФП.

Формирование единичной строки цифрового радиографического изображения аналогично формированию единичной проекции в специальных реализациях цифровой радиографии и в компьютерной томографии. Отличие заключается в том, что в СРЦР для повышения информативности метода необходимо несколько ракурсов, а в компьютерной томографии для оценки внутренней структуры по сечению ОК необходимо значительное количество ракурсов [35–37]. Здесь под внутренней структурой понимается распределения некоторого информативного параметра по объёму ОК, в качестве которого может выступать, например, плотность ρ . В компьютерной томографии для описания всей совокупности проекций, необходимой для восстановления распределения плотности ρ по сечению объекта, вводятся две системы координат: подвижная система координат XOY и неподвижная система координат $X'OY'$. Текущее положение подвижной системы координат относительно неподвижной характеризуется углом поворота θ . В классической реализации КТ угол θ изменяется от 0 до 180° . Для СРЦР и КТ к описанным выше параметрам необходимо добавить количество проекций.

Подвижная и неподвижная системы координат и связаны друг с другом простейшими соотношениями

$$\begin{aligned} x &= x' \cos \theta + y' \sin \theta \\ y &= -x' \sin \theta + y' \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

В предыдущем пункте отмечено, что к параметрам геометрической схемы относится фокусное расстояние – F и длина линейка детекторов – L , которые определяют два параметра – радиус ОК $R=D/2$ и половина используемого угла пучка ИТИ – φ_{\max} . Отметим, что тень объекта контроля не должна полностью накрывать РРИ (РТИ). Это необходимо не только для обеспечения высокой производительности контроля в ЦР (СРЦР, КТ), но и для проведения калибровки по «белому», обеспечивающей коррекцию расхождения коэффициентов преобразования поглощённой энергии в АС для каналов ППИ (РТИ).

Формулы связи параметров геометрической схемы F, L, R имеют вид

$$\begin{aligned} L &= 2F \tan \varphi_0 + 2\Delta_L \\ \varphi_0 &= \arcsin\left(\frac{R}{F - R - A}\right), \\ \varphi_{\max} &= \arctan\frac{L}{2F} \end{aligned} \quad (4)$$

где Δ_L — размер противоположных частей линейки детекторов, не попадающих в тень ОК;

A — минимальное расстояние от ОК до линейки детекторов (смотри рисунок 1).

Из анализа рисунка 1 можно сделать вывод о том, что прозрачность ОК по некоторому лучу L_x , соединяющему излучающую точку и точку детектирования с координатой x (смотри рисунок 1), определяется толщиной ОК по стали $H_{st}(x)$ по этому лучу.

Остановимся на расчёте распределения толщины объекта контроля по стали по линейке детекторов.

2.3 Расчёт распределения толщины объекта контроля по стали по линейке детекторов

Выше подчёркнуто, что для вычисления единичной строки радиографического изображения в ЦР (одной проекции в СРЦР и КТ) необходимо рассчитать $H_{st}(x)$ — распределение толщины ОК по стали по лучам L_x , с координатой x , пробегающей от первого до последнего детектора линейки. Пусть x координата детектирующей точки на детекторной линейке $x \in [-L/2, L/2]$, тогда толщина $H_{st}(x)$ (смотри рисунок 1) находится по формуле

$$H_{st}(x) = \begin{cases} 0, & \varphi_x > \varphi_0 \\ 2\sqrt{R^2 - d^2(x)}, & \varphi_H \leq \varphi(x) \leq \varphi_0 \\ 2\left(\sqrt{R^2 - d^2(x)} - \sqrt{(R - H)^2 - d^2(x)}\right), & 0 \leq \varphi(x) \leq \varphi_H \end{cases} \quad (5)$$

здесь $d(x)$ — расстояние от оси ОК до луча L_x , соответствующего координате x ;
 $\varphi(x)$ — угол между осью пучка и лучом L_x ;

φ_H — угол между осью пучка и касательной внутренней поверхностью трубы (смотри рисунок 1).

Выражения для вычисления вспомогательных параметров $d(x)$, $\varphi(x)$, φ_H имеют вид

$$\begin{aligned}\varphi(x) &= \left| \arctan\left(\frac{x}{F}\right) \right|, \\ \varphi_H &= \left| \arcsin\left(\frac{R-H}{F-R-H}\right) \right|, \\ d(x) &= (F-R-A) |\sin(\varphi(x))|\end{aligned}\quad (6)$$

Из анализа зависимости $H_{st}(x)$ можно сделать вывод о том, что максимальная толщина исследуемого объекта по стали $H_{st\ max} = \max_{-R \leq x \leq R} H_{st}(x)$ вычисляется по формуле

$$H_{st\ max} = 2\sqrt{H(D-H)}. \quad (7)$$

Выражения (5)–(7) являются основой для оценки единичных строк радиографических изображений (проекций в СРЦР и КТ).

2.4 Математическая модель формирования единичной строки радиографического изображения

Пусть ось линейного регистратора совпадает с линией $y=y_d$, координата x точки детектирования изменяется в диапазоне от $-B$ до B , здесь $B=L/2$. В цифровой радиографии для рассматриваемого случая идеальная строка радиографического изображения $p(\theta, x)$ $x \in [-B, B]$ (идеальная проекция в СРЦР и КТ) представляет собой распределение толщины ОК в единицах длины свободного пробега (д.с.п.) по лучам $L_{\theta, x}$. Отличие ЦР и СРЦР с КТ заключается в том, что в угол θ в ЦР фиксирован, а в СРЦР и КТ он пробегает некоторое множество значений, в КТ $\theta \in [0, \pi]$.

Из данного выше определения идеальной строки радиографического изображения $p(\theta, x)$ (проекции в СРЦР и КТ) вытекает следующее выражение для её оценки

$$p(\theta, x) = -\ln \frac{I_0}{I(\theta, x)}, \quad (8)$$

здесь $I(\theta, x)$ — значение аналогового сигнала (АС) за ОК;

I_0 — значение АС без ОК.

Функции $I(\theta, x)$ для произвольного объекта определяется соответствующими распределениями эффективного атомного номера $Z(\theta, h)$ и плотности $\rho(\theta, h)$ по лучам $L_{\theta, x}$. Формула для вычисления функции $I(\theta, x)$ с точностью до коэффициента передачи энергии C_t имеет следующий вид

$$I(\theta, x) = C_t N_0 \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) E_{ab}(E) e^{-\int_{L_{\theta, x}} m(E, Z(\theta, h)) \rho(\theta, h) dh} \varepsilon(E, h_d) dE, \quad (9)$$

где m — массовый коэффициент ослабления (МКО) для фотонов с энергией E и материала с эффективным атомным номером Z ;

$\varepsilon(E, h_d)$ — эффективность регистрации излучения; $E_{ab}(E)$ — среднее значение энергии, переданной зарегистрированным фотоном материалу РЧП.

Выражение для определения I_0 выводится из (9)

$$I_0 = C_t N_0 \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) E_{ab}(E) \varepsilon(E, h_d) dE. \quad (10)$$

Совокупность аналоговых сигналов I_0 и $I(\theta, x)$ трансформируется в совокупность цифровых сигналов (ЦС). Очевидно, что для рассматриваемого случая I_0 константа и $I_0 \geq I(\theta, x)$. Поэтому интервал дискретизации Δ вычисляется по формуле

$$\Delta = \frac{CI_0}{2^{k_{\text{ADC}}} - 1}. \quad (11)$$

где $C, C > 1$ — коэффициент защиты от превышения ЦС значения $2^{k_{\text{ADC}}} - 1$ при флуктуациях АС.

Выражение для вычисления оценки единичной строки цифрового радиографического изображения (проекции в СРЦР и КТ) $p_d(\theta, x)$ имеет вид

$$p_d(\theta, x) = -\ln \frac{\left[\frac{I_0}{\Delta} \right]}{\left[\frac{I(\theta, x)}{\Delta} \right]}, \quad (12)$$

где $[\arg]$ – целая часть аргумента \arg .

Совокупность выражений (1)–(12) представляют собой упрощенную модель формирования цифровых радиографических изображений в системах ЦР (проекций в системах СРЦР и КТ) для обобщённого ОК.

Рассматриваемый ОК имеет свою специфику, поэтому приведём выражения для оценки проекций в системах СРЦР и КТ именно для него.

Специфика рассматриваемого объекта контроля заключается в однородности материала и в том, что он является осесимметричным. Если ось вращения ОК при сканировании совпадает с его осью симметрии, то

$$I(\theta_1, x) = I(\theta_2, x) = I(x), \forall \theta_1, \theta_2 \in [0, 180^\circ]. \quad (13)$$

С учётом этого выражение (9) трансформируется следующим образом

$$I(x) = C_t N_0 \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) E_{ab}(E) e^{-m_{st}(E) \rho_{st} H_{st}(x)} \varepsilon(E, h_d) dE. \quad (14)$$

Функция $H_{st}(x)$ для схемы формирования проекций в КТ, приведённой на рисунке 1, описывается выражениями (5)–(7).

Из практических соображений, относящихся к выбору максимальной энергии источника тормозного излучения E_{\max} , представляет особый интерес значение $H_{st \max}$. В таблице 1 приведены диаметры и толщины стенок крупногабаритных стальных труб [28], а также результаты вычислений максимальных лучевых толщин $H_{st \max}$ по стали для предельных H_{\lim} и промежуточных H_{med} значений толщин труб.

В работе [38] рассмотрен ряд вопросов, касающихся проектирования систем контроля ОК с толщиной по стали, превышающих 300 мм. Из анализа данных из таблицы 1 и результатов, приведённых в [38], следует, что для получения цифровых радиографических изображений в ЦР (проекций в СРЦР и КТ) применительно к рассматриваемым ОК в геометрии просвечивания через

«две стенки» не существует альтернативы источнику тормозного излучения с максимальной энергией $E_{\max}=9$ МэВ.

Таблица 1

Максимальная лучевая толщина H_{\max} крупногабаритных стальных труб (ГОСТ 31447-2012)

D , мм	530	630	720	820	1020	1220	1420
H_{\lim} , мм	31	33	40	40	46	48	50
$H_{st \max}$, мм	248	280	329	352	422	474	523
H_{med} , мм	20	22	26	28	30	35	40
$H_{st \max}$, мм	201	230	268	297	344	406	469

Математическая модель формирования единичных цифровых радиографических изображений в ЦР (проекций в СРЦР и КТ), основанная на совокупности выражений (1)–(14) близка к модели работы [38].

Следует отметить, что отличие энергетического спектра ИТИ от идеального спектра (δ -функция) приводит смещению уровня информационного сигнала. В КТ трансформация смещения в исходных проекциях приводит к смещениям и в реконструируемых изображениях. Конечное смещение называется артефактом немонотонности, который является одним из наиболее значимым артефактов в КТ. Возможно снижение влияния этого смещения на качество контроля методами ЦР и КТ способом предварительных возмущений цифровых радиографических изображений (проекций). Для рассматриваемой задачи отмеченное снижение достигается коррекцией исходных изображений (проекций) на базе предварительных калибровочных измерений кривой ослабления по специально организованным тестовым образцам (ТО), изготовленным из материала ОК.

2.5 Коррекция немонотонности в цифровой радиографии и компьютерной томографии

Коррекция немонотонности методом калибровочных измерений сводится к оценке массовой толщины по лучу на основе экспериментальной

оценки толщины ОК по этому же лучу в длинах свободного пробега с использованием результатов калибровочных измерений.

В формализованном виде описанная коррекция сводится к двум последовательным этапам.

На предварительном этапе по ступенчатым или клиновидным ТО строится функция $P(\rho_{st}h_{st})$, аппроксимирующая зависимость толщины ТО в д.с.п. P от массовой толщины $\rho_{st}h_{st}$

$$P(\rho_{st}h_{st}) = -\ln \frac{\left[\frac{I(\rho_{st}h_{st})}{\Delta} \right]}{\left[\frac{I_0}{\Delta} \right]}. \quad (15)$$

К функции $P(\rho_{st}h_{st})$ на интервале её определения выдвигаются требования непрерывности, гладкости и монотонности возрастания. Такие требования являются достаточными для существования функции P^{-1} обратной к функции P .

На втором этапе производится трансформация исходных единичных строк цифровых радиографических изображений $p_d(\theta, x)$ (проекций в СРЦР и КТ) в $p_d^*(\theta, x)$

$$p_d^*(\theta, x) = P^{-1}(p_d(\theta, x)). \quad (16)$$

Дополнение (15), (16) к математической модели (1)–(14) позволяет получить в системах цифровой радиографии распределения массовой толщины ρH по x , а в системах компьютерной томографии после реконструкции – оценку распределения плотности по сечению объекта контроля – $\rho(x, y)$.

Помимо рассмотренного выше искажения первичных информационных сигналов применительно к рассматриваемой задаче является значимым ещё одно искажение. В методах КТ это искажение называется металлическим артефактом, который характерен и для систем цифровой радиографии и проявляется в полной непрозрачности фрагментов исследуемых объектов контроля. Причиной такого артефакта является ненадлежащий выбор максимальной энергии рентгеновского (тормозного) излучения, а также

ненадлежащий выбор разрядности АЦП. В случае ненадлежащего выбора разрядности АЦП диапазон изменения аналоговых сигналов не согласуется с диапазоном изменения цифровых сигналов.

2.6 Согласование диапазонов изменения аналоговых и цифровых сигналов

В различных реализациях ЦР подчеркнута необходимость согласования диапазонов изменения АС и ЦС [38, 39]. Этот же вывод можно отнести и к СРЦР и КТ, так как одним из артефактов КТ, как уже выше подчеркнуто, является металлический артефакт [40–43], который обуславливается «непрозрачностью» локальных областей (структурных фрагментов) ОК. Здесь локальный объём (структурный фрагмент) называется «непрозрачным», если ЦС за ним после калибровки по «чёрному» равен или близок к нулю. Из сказанного выше следует, что термин «непрозрачность» является достаточно условным, так близость откалиброванного цифрового сигнала к нулю может быть связана с ненадлежащим выбором параметров систем ЦР, СРЦР и КТ, например, максимальной энергии рентгеновского (тормозного) излучения E_{\max} , разрядности АЦП k , времени измерения.

Традиционный метод компенсаторов [44, 45], используемый в системах ЦР и КТ для уменьшения диапазона изменения АС, трудно реализовать для исследования описанных выше объектов интереса, что связано со значительными размерами этих объектов, а это приводит к значительным размерам компенсаторов.

3 Примеры имитационного моделирования цифровых радиографических изображений (проекций) крупногабаритных труб

Для имитационного моделирования были выбраны следующие параметры: материал ОК – сталь Ст-4; диаметры труб и толщины их стенок – из табл. 1; $E_{\max}=9$ МэВ; материал РЧП – CdWO_4 ; $h_d=0,3$ мм; размер пикселя – $a_d \times b_d = 0,2 \times 0,2$ мм²; размеры детектора – 140×40 мм². Разрядность АЦП k_{ADC} – 16, 20 и 24, а параметр N_0 – 10^3 , 10^4 , 10^5 фотонов.

На рисунке 2 приведены изображения цифровых радиографических изображений труб диаметром $D=530$ мм и толщиной стенки $H_{\text{lim}}=31$ мм и $H_{\text{med}}=20$ мм. Красным отмечены пиксели непрозрачности.

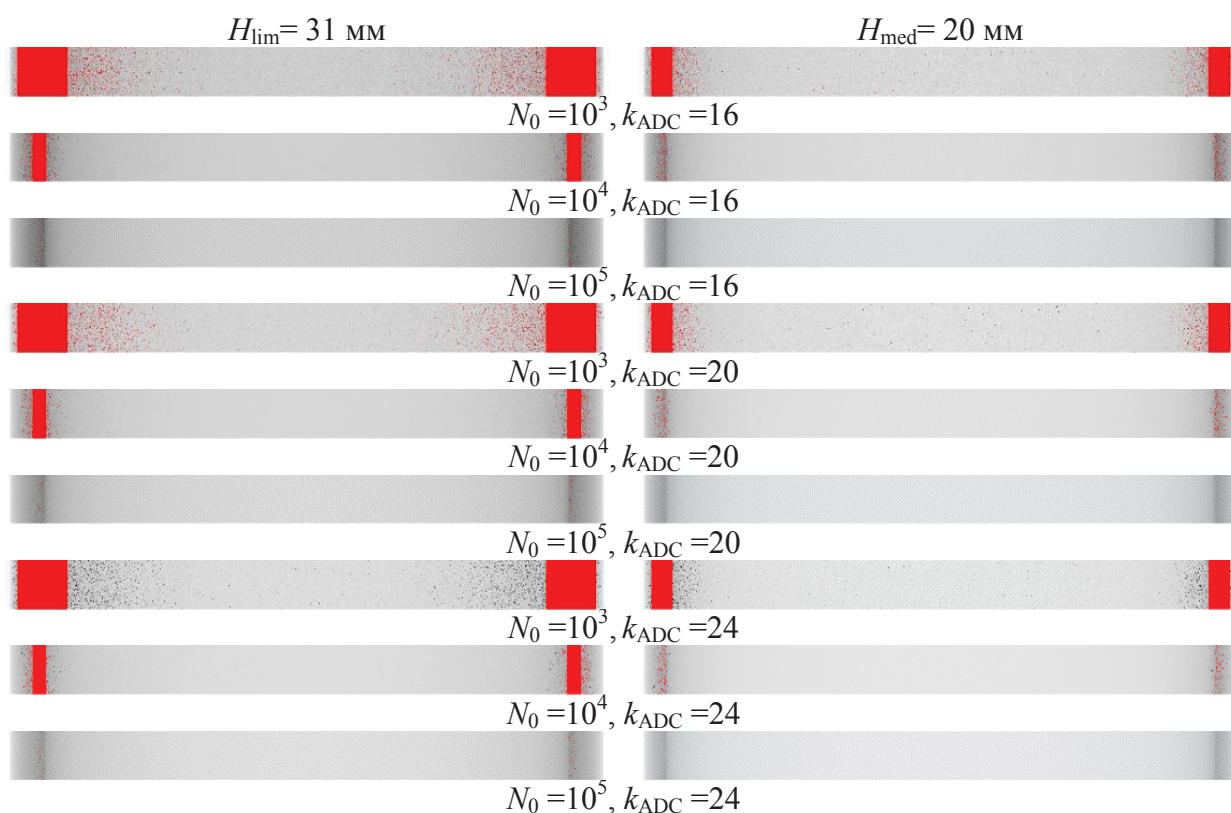


Рисунок 2 – Радиографические изображения труб диаметром $D=530$ мм

Из анализа цифровых радиографических изображений, приведённых на рисунке 2 можно сделать вывод о значимости параметров N_0 и k_{ADC} . Увеличение параметра N_0 приводит к снижению уровню шумов в цифровых радиографических изображениях. Увеличение разрядности АЦП приводит к уменьшению зоны непрозрачности.

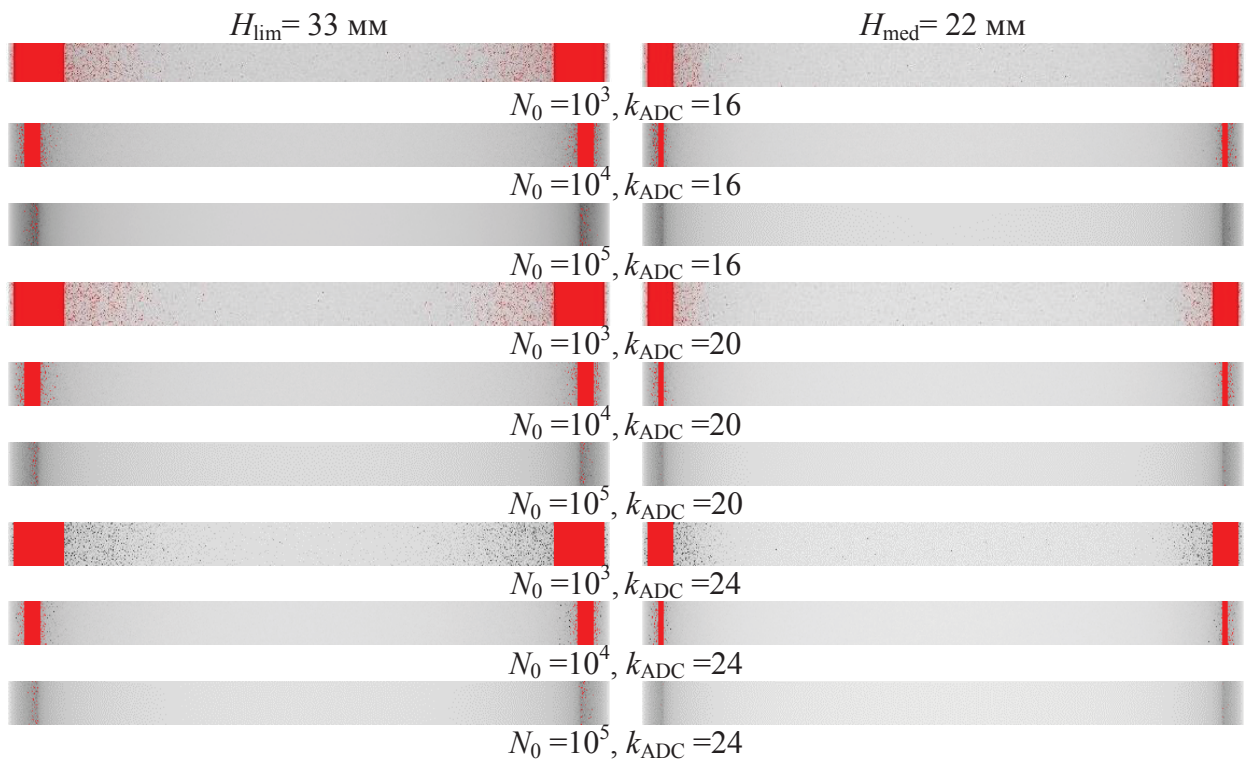


Рисунок 3 – Радиографические изображения труб диаметром $D=630$ мм

На рисунках 3–8 приведены цифровые радиографические изображения для труб диаметром $D=630, 720, 820, 1020, 1220, 1420$ мм и соответствующими толщинами стенок H_{lim} и H_{med} , смотри таблицу 1. Отметим, что для $D=1020$ мм и $D=1220$ мм расчёты проводили для значений параметра N_0 — $10^5, 10^6, 10^7$ фотонов и k_{ADC} 20 и 24, для $D=1420$ мм расчёты проводили для значений параметра N_0 — $10^6, 10^7, 10^8$ фотонов и $k_{ADC}=24$.

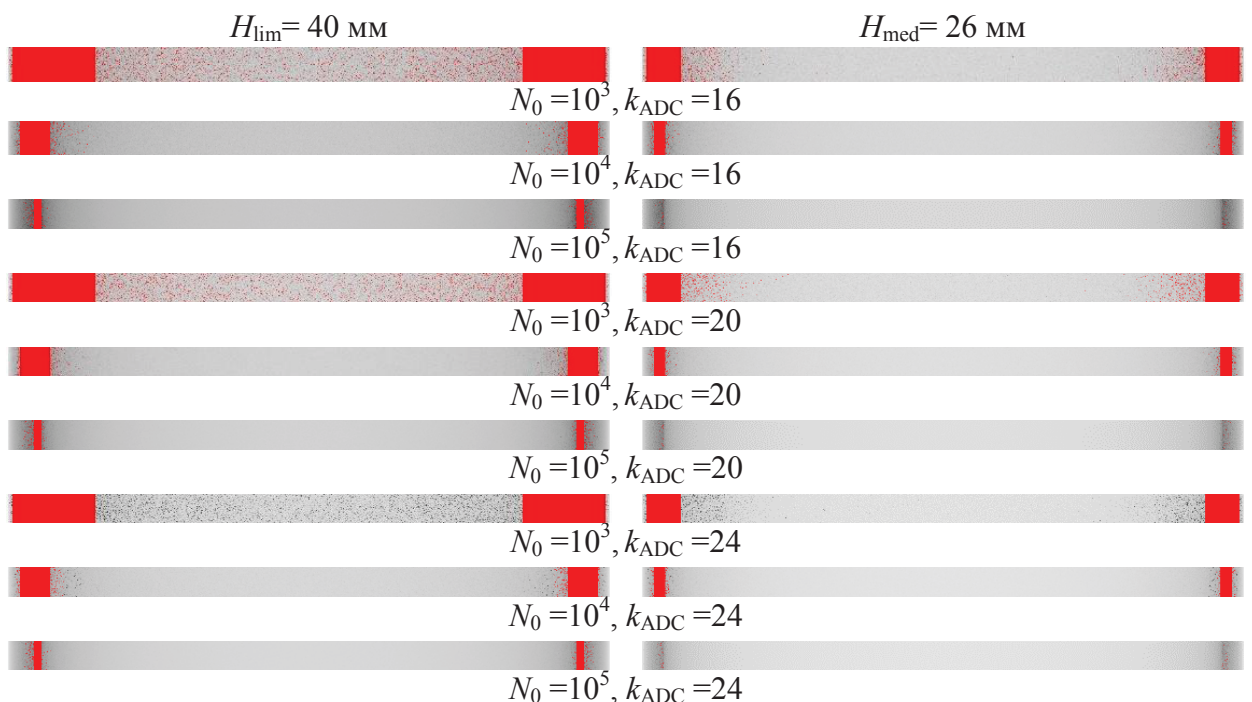


Рисунок 4 – Радиографические изображения труб диаметром $D=730$ мм

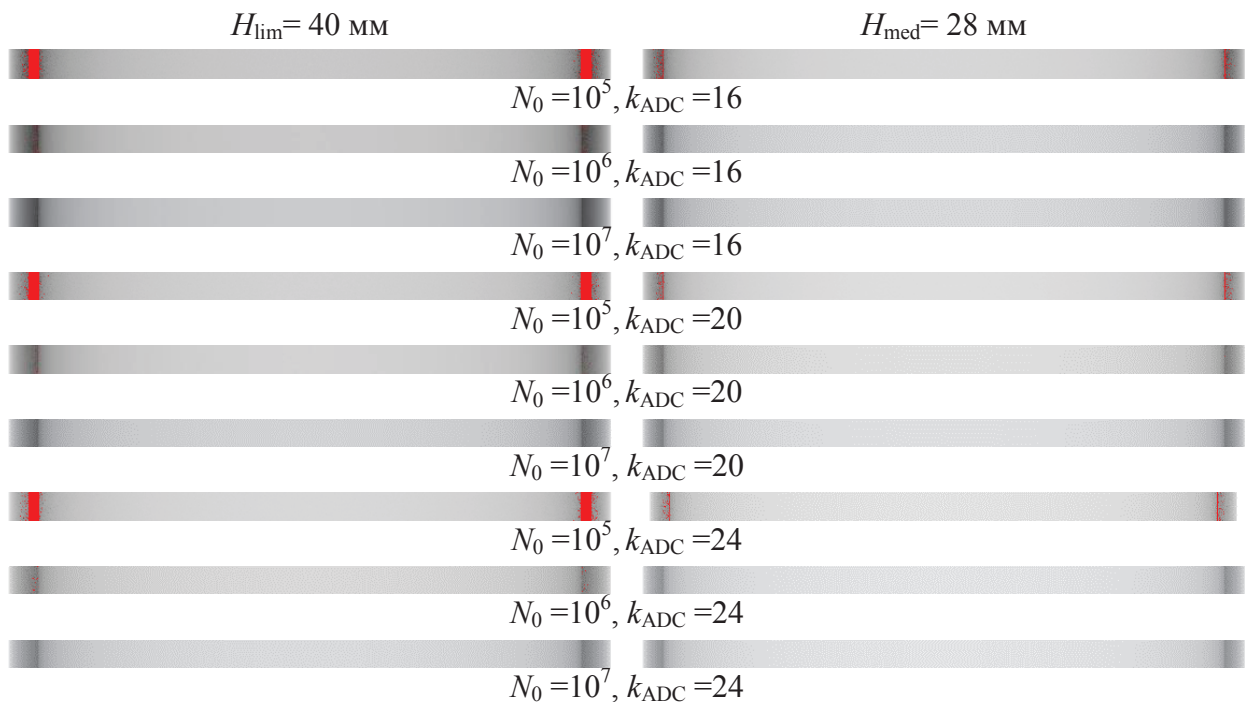


Рисунок 5 – Радиографические изображения труб диаметром $D=820 \text{ мм}$

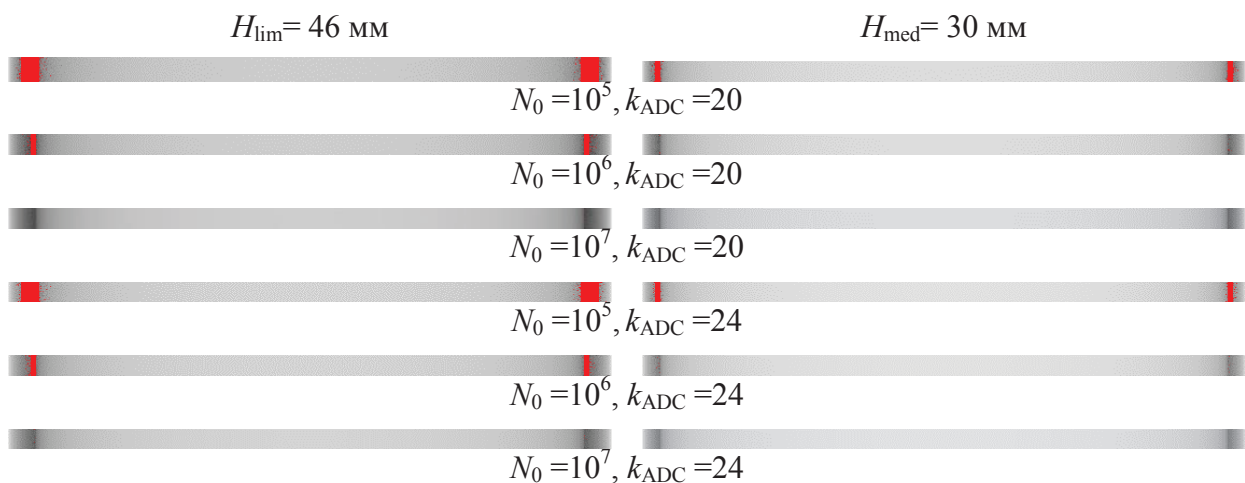


Рисунок 6 – Радиографические изображения труб диаметром $D=1020 \text{ мм}$

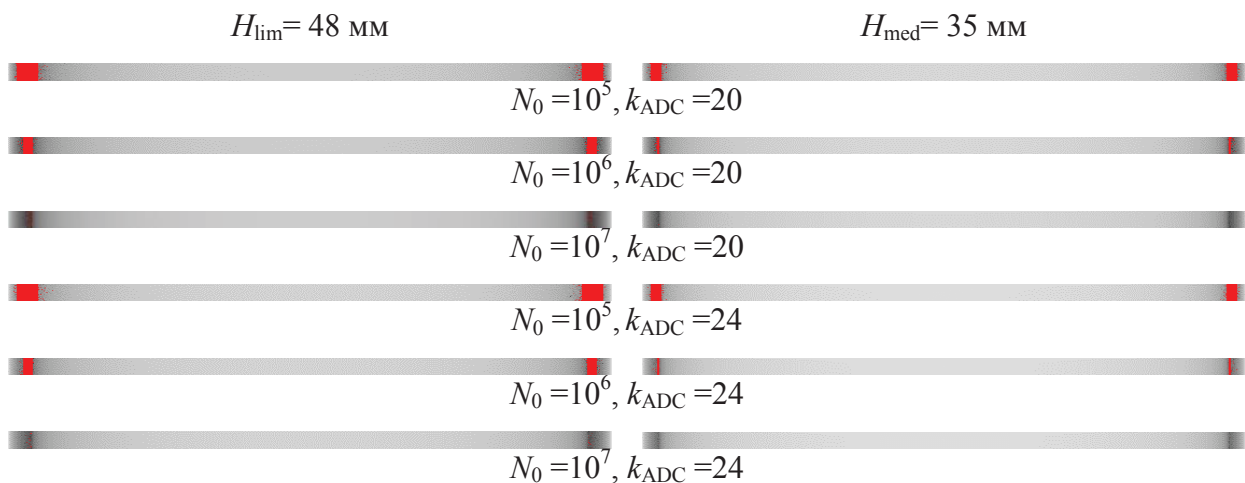


Рисунок 7 – Радиографические изображения труб диаметром $D=1220 \text{ мм}$

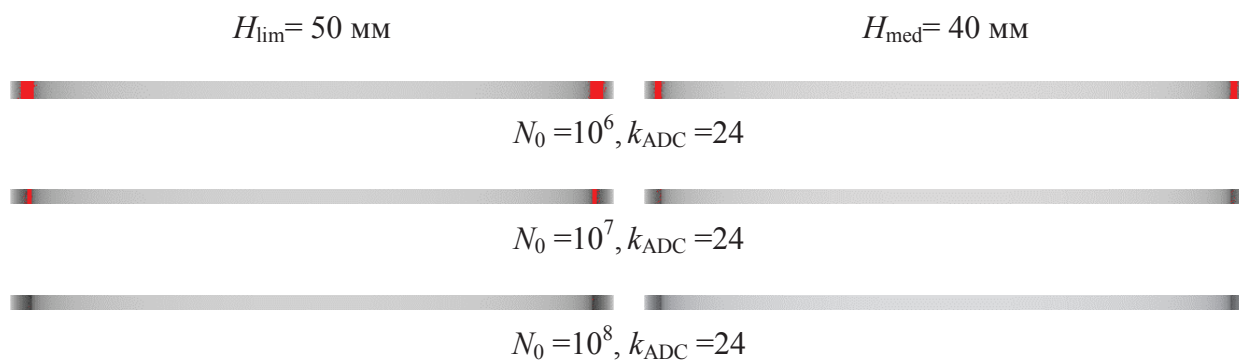


Рисунок 8 – Радиографические изображения труб диаметром $D=1420$ мм

Данные, приведённые на рис. 2–8, проиллюстрировали необходимость учёта при проектировании систем ЦР (СРЦР и КТ) разрядности АЦП и количества фотонов, падающих на фронтальную поверхность РЧП, соответствующую одному пикселю.

В следующем разделе продемонстрируем возможность оценки радиального распределения плотности ρ методом КТ применительно к рассматриваемой задаче с помощью обратного преобразования Абеля (инверсии Абеля) [46–50].

4. Оценка распределения плотности по сечению трубы

Приведём ряд необходимых пояснений относительно применения инверсии Абеля для рассматриваемого случая сканирования.

В качестве информативного параметра в данном случае выступает оценка плотности – ρ .

Связь оценки радиального распределения $\rho(r)$ и проекции $p(x)$ в геометрии параллельного пучка описывается выражением (инверсия Абеля)

$$\rho(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{p(x)}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx. \quad (17)$$

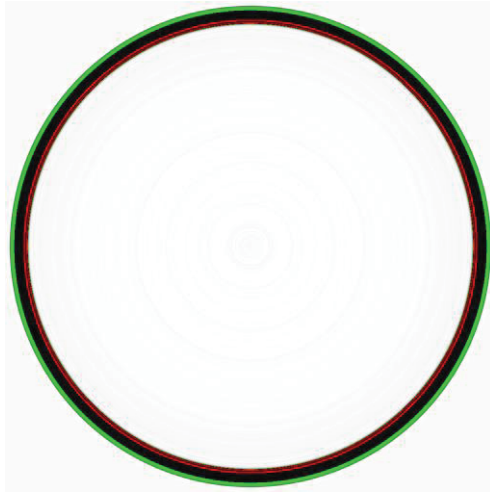
Пусть $p_d^*(x)$ – единичная проекция для случая узкого расходящегося пучка. Указанная проекция пересчитывается в проекцию $p(x)$ следующим образом

$$p(x) = p_d^*(d(x)). \quad (18)$$

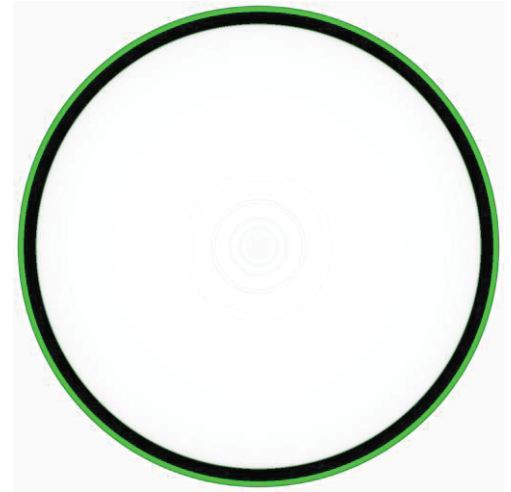
где $d(x)$ — функция из (8).

Для проверки возможности применения КТ для контроля крупногабаритных труб было проведено несколько реконструкций с учётом рекомендаций по выбору параметров N_0 и k_{ADC} . На рис. 9 приведены реконструированные изображения $\rho(r)$. Красным отмечены пиксели с оценками плотности свыше $7,8 \text{ г/см}^3$, а зелёным — от 5 г/см^3 до 7 г/см^3 . Занижение плотности характерно для слоя, близкого к внешней поверхности трубы, а завышение — для слоя, близкого к внутренней поверхности трубы.

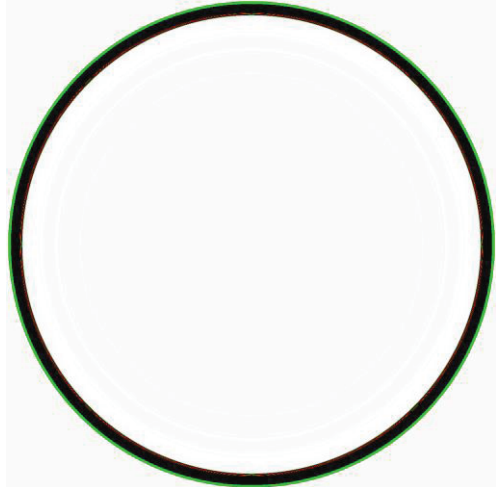
Анализ изображений, приведённых на рисунке 9, подтверждает рекомендации по выбору параметров N_0 и k_{ADC} с целью достижения заданного уровня качества контроля применительно к испытаниям стальных труб методом КТ. Ниже рассмотрим техническую реализуемость системы компьютерной томографии с рекомендуемыми значениями отмеченных выше параметров.



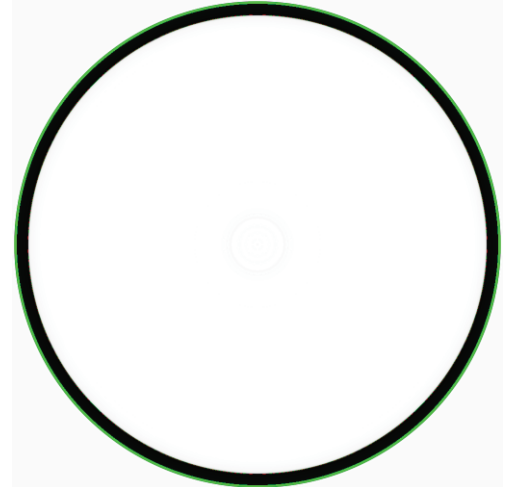
$D=530 \text{ мм}, H=20 \text{ мм}, N_0=10^5, k_{\text{ADC}}=16$



$D=530 \text{ мм}, H=20 \text{ мм}, N_0=10^6, k_{\text{ADC}}=16$



$D=1220 \text{ мм}, H=35 \text{ мм}, N_0=10^7, k_{\text{ADC}}=24$



$D=1220 \text{ мм}, H=35 \text{ мм}, N_0=10^8, k_{\text{ADC}}=24$

Рисунок 9 – Реконструированные зависимости $\rho(r)$

5 О технической реализуемости методов цифровой радиографии и компьютерной томографии применительно к контролю крупногабаритных труб

5.1 Методика расчёта времени сканирования

Уровень шумов и, следовательно, заданную производительность определяет значение параметра N_0 . Визуальный подбор значения N_0 (смотри рисунок 2–8) связан с субъективностью, поэтому необходим некоторый объективный критерий для обоснования выбора N_0 . Значение N_0 может быть выбрано из условия достижения заданного уровня относительной погрешности δ радиометрического сигнала I за объектом толщиной $H_{st \max}$. Соответствующее выражение выводится из формул, приведённых в работе [38],

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{N_0 \frac{I(\rho_{st} H_{st \max})}{I(0)}}} \Rightarrow N_0 \approx \frac{1}{\delta^2 \frac{I(\rho_{st} H_{st \max})}{I(0)}}. \quad (19)$$

Отметим, что уровень заданной погрешности δ на практике не должен быть излишне маленьким, достаточно ограничиться уровнем $\delta=0,2$.

Формула для оценки потока энергии тормозного излучения Φ на выходе источника тормозного излучения с напряжением U [В] и током i [А] имеет вид [51]

$$\Phi = KiU^2Z, \quad (20)$$

где Z – эффективный атомный номер материала мишени, для вольфрама $Z=74$; K [1/В] — коэффициент.

Для полного поглощения электронов в мишени $K=1,5 \times 10^{-9}$ 1/В, в практических расчётах используют меньшее значение, например, $K=1 \times 10^{-9}$ 1/В.

Для оценки времени сканирования T необходимо пересчитать поток энергии Φ в поток квантов n_0

$$n_0 = \Phi / \overline{E_X}, \quad (21)$$

здесь $\overline{E_X}$ — средняя энергия фотонов

$$\overline{E}_X = K_X \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) E dE. \quad (22)$$

Коэффициент K_X в формуле (21) служит для перевода энергии из электрон-вольт в джоули $K_X = 1,60218 \times 10^{-19}$ Дж/эВ.

Конечное выражение для определения общего времени сканирования T запишется следующим соотношением

$$T = \frac{4\pi F^2 N_0 180^\circ}{n_0 a_d b_d \Delta_\theta^\circ}, \quad (23)$$

здесь Δ_θ° шаг сканирования по углу.

Формулы (18)–(22) позволяют рассчитать время T для рассматриваемых объектов.

5.2 Выбор разрядности АЦП

Разрядность АЦП k_{ADC} выбирается из условия согласования диапазонов изменения АС и ЦС. Пусть M_{ADC} — уровень ЦС за ОК толщиной $H_{st \max}$ по стали, тогда уравнение связи разрядности АЦП и кратности ослабления излучения имеет вид

$$k_{\text{ADC}} = \left[\log_2 \left(\frac{M_{\text{ADC}} I(0)}{I(\rho_{st} H_{st \max})} \right) \right] + 1, \quad (24)$$

здесь $[\arg]$ – целая часть \arg .

Введение параметра M_{ADC} необходимо для обнаружения изменения толщины $H_{st \max}$ в сторону увеличения.

Ниже приведём пример расчёта времени сканирования T и разрядности АЦП k_{ADC} .

5.3 Пример расчёта времени сканирования и разрядности АЦП

Рассчитаем время сканирования по формулам (19)–(23) для объектов контроля, параметры которых приведены в таблице 1. В качестве ИТИ был выбран бетатрон МИБ-9 [52] с параметрами: $U=9$ МВ; $i=0,55$ мА; $\varphi_{\max}=30^\circ$.

Параметры геометрической схемы контроля рассчитывались в соответствии с рекомендациями, описанными выше. Одновременно оценивалась необходимая разрядность АЦП k_{ADC} (24) для $M_{ADC}=10$.

В таблице 2 приведены результаты расчётов времени сканирования T и необходимой разрядности АЦП k_{ADC} , $k_{ADC} \geq 16$, для ОК из таблицы 1 для шага сканирования по углу $\Delta_\theta = 1^\circ$ и поперечных размеров РЧП $a_d=b_d=1$ мм.

Отметим, что в настоящий момент времени в неразрушающих методах контроля и средствах измерений применяются 16-битные АЦП, но используются также АЦП с разрядностью 24 [53–56].

Таблица 2

Время сканирования T , час и k_{ADC} для ОК из табл. 1

D , мм	530	630	720	820	1020	1220	1420
H_{lim} , мм	31	33	40	40	46	48	50
k_{ADC}	16	16	17	17	20	22	23
T , час	0,00181	0,00549	0,0238	0,0531	0,440	2,168	9,388
H_{med} , мм	20	22	26	28	30	35	40
k_{ADC}	16	16	16	16	17	19	21
T , час	0,00053	0,00132	0,00512	0,0135	0,0647	0,414	2,550

Из анализа результатов расчётов можно сделать вывод о низкой производительности контроля сварных швов магистральных труб с диаметром, превышающим 1220 мм, методом КТ. Отметим, что мощность тормозного излучения линейных ускорителей электронов VARIAN (USA) [57] и НИИ ЭФА (Россия) [58] по сравнению с бетатроном МИБ-9 в сто и более раз выше.

Другим подходом, позволяющим эффективно согласовывать диапазоны аналоговых и цифровых сигналов, является применение логарифмических усилителей АС [59–61].

Заполнение внутреннего объёма трубы специальным образом подобранным материалом, дополненное внешним компенсатором, позволит не только сузить диапазон изменения АС, но существенно снизить артефакты немоноэнергетичности.

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Разработка НИР производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента-дипломника.

Данная выпускная квалификационная работа заключается в усовершенствовании метода дуальных энергий на основе выбора металлических фильтров.

Объектом исследования при ее выполнении является непосредственно метод дуальных энергий.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НТИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки НТИ;
- осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- рассчитать бюджет затрат на исследования;
- произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

К научно-исследовательским работам относятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, которые выполняются с целью расширения, углубления и систематизации знаний по определенной научной проблеме и создания научного задела.

6.1 Технико-экономическое обоснование НИР

Применяемые в промышленности радиационные методы контроля опираются на достижения многих отраслей науки и техники. Они имеют общую физическую основу – закономерности, определяющие формирование

радиографического изображения и его информативность. Изучение этих закономерностей позволяет оптимально построить схему радиационного контроля оценить время на его проведение и спрогнозировать получаемое качество измерений.

Рентгеновские фильтры — металлические пластины, применяемые для получения практически однородного рентгеновского излучения. Тормозное рентгеновское излучение содержит фотоны всех энергий от минимального значения (практически нуль) до максимального значения, определяемого приложенным к рентгеновской трубке напряжением. При прохождении через рентгеновские фильтры излучение ослабляется неравномерно: количество фотонов малой энергии (длинноволновая часть спектра) уменьшается в большей степени, чем количество фотонов большой энергии (коротковолновая часть спектра). Неравномерность ослабления зависит от материала и толщины рентгеновского фильтра. Фильтрованное излучение содержит относительно большее количество фотонов высокой энергии, становится более жестким.

Применение предварительной фильтрации позволяет ассоциировать трансформированный поток рентгеновского (тормозного) излучения с монохроматическим источником гамма-излучения (радионуклидом). Следует отметить, что выбор толщины предварительного фильтра зависит от поставленной задачи.

Коммерческого потенциала у данного исследования нет, поскольку оно выполняется в рамках ВКР и в большей степени олицетворяет теоретическую значимость полученных результатов.

Произведем также в данном разделе SWOT анализ НТИ, позволяющий оценить факторы и явления, способствующие или препятствующие продвижению проекта на рынок.

В таблице 3 описаны сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы реализации НТИ, которые могут появиться в его внешней среде.

SWOT-анализ НИР

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
С1. Данный метод все больше и больше изучается, дорабатывается; С2. Метод, описанный в работе, несет в себе экономичность и ресурсоэффективность; С3. Актуальность метода С4.; Наличие опытного руководителя	В1. Нетрудоемкая адаптация научного исследования под иностранные языки; В2. Большой потенциал применения метода в России и других странах;
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с данным методом Сл2. Дороговизна данного метода Сл3. Сложное оборудование для проведения эксперимента	У1. Отсутствие спроса на данный метод; У2. Возможность создания более доступного в цене аналогового метода

Далее выявим соответствия сильных и слабых сторон НИР внешним условиям окружающей среды (см. таблицы 4–7).

Таблица 4

Сильные стороны проекта

Возможности проекта		С1	С2	С3	С4
	В1	+	–	+	+
	В2	+	+	+	0

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные стороны и возможности: В1С1С3С4, В2С1С2С3.

Таблица 5

Слабые стороны проекта

Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	В1	0	+	0
	В2	0	+	+

Таблица 6

Сильные стороны проекта

Угрозы		С1	С2	С3	С4
	У1	+	+	0	–
	У2	+	0	0	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные стороны и угрозы: У1С1С2, У2С1С4.

Таблица 7

Слабые стороны проекта

Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	–	+	+
	У2	0	+	+

Итак, самой большой угрозой для проекта является отсутствие спроса. Также среди угроз можно отметить дороговизну метода, в следствие чего потребитель будет использовать более дешевые методы.

Что касается слабых сторон, то для данного метода, во избежание их влияния, требуется привлечение опытных и квалифицированных специалистов, обеспечить обучение нового персонала со знаниями цифровой радиографии, компьютерной томографии.

Таким образом, несмотря на то, что коммерческого потенциала у данного исследования нет и оно в большей степени олицетворяет теоретическую значимость полученных результатов, результаты НТИ актуальны для предприятий, занимающихся дефектоскопией, рентгенографией, томографией.

6.2 Планирование работ по научно-техническому исследованию

Для правильного планирования, а также финансирования и определения трудоемкости выполнения НИР необходимо ее разбить на этапы. Под этапом понимается крупная часть работы, которая имеет самостоятельное значение и является объемом планирования и финансирования. НИР имеет:

- Подготовительный этап. Сбор, изучение и анализ, имеющийся информации. Определение состава исполнителей и соисполнителей, согласование с ними частных задач. Разработка и утверждение задания.
- Разработка теоретической части.
- Проведение эксперимента
- Выводы и предложения по теме, обобщение результатов разработки.

– Завершающий этап. Рассмотрение результатов исследования.
Утверждение результатов работы. Подготовка отчетной документации.

Данную НИР можно разделить на следующие этапы:

- Разработка задания на НИР;
- Выбор направления исследования;
- Теоретические и экспериментальные исследования;
- Обобщение и оценка результатов;
- Оформление отчета НИР.

Работу выполняло 2 человека: руководитель, студент-дипломник.

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Разделим выполнение дипломной работы на этапы, представленные в таблице 8.

Таблица 8

Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка задания на НИР	1	Составление и утверждение задания НИР	Осипов С.П. Цзян Шань
Проведение НИР			
Выбор направления исследования	2	Изучение методов цифровой радиографии	Цзян Шань
	3	Календарное планирование работ	Осипов С.П. Цзян Шань
	4	Подготовка образцов для эксперимента	Осипов С.П. Цзян Шань
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение экспериментов	Осипов С.П. Цзян Шань
	6	Снятие показаний	Цзян Шань
	7	Обработка полученных данных	Осипов С.П. Цзян Шань
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ полученных результатов, выводы	Цзян Шань
	9	Оценка эффективности полученных результатов	Осипов С.П. Цзян Шань
Оформление отчета НИР	10	Составление пояснительной записки	Цзян Шань

6.2.1 Определение трудоемкости этапов НИР

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{min\ i} + 2 \cdot t_{min\ i}}{5}, \quad (25)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pt} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, \quad (26)$$

где T_{pt} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k, \quad (27)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{\text{КГ}}}{T_{\text{КГ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}}, \quad (28)$$

где $T_{\text{КГ}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{ВД}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{ПД}}$ – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k = \frac{T_{\text{КГ}}}{T_{\text{КГ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} = \frac{365}{365 - 104 - 10} = 1,45, \quad (29)$$

тогда длительность этапов в рабочих днях, следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ $T_{\text{к}}$ нужно округлить до целых чисел.

Результаты расчетов приведены в таблице 6.7.

6.2.2 Техническая готовность темы

Определение технической готовности темы позволяет дипломнику точно знать, на каком уровне выполнения находится определенный этап или работа. Показатель технической готовности темы характеризует отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период дипломного проектирования составляет примерно 6 месяцев, дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

Для начала следует определить удельное значение каждой работы в общей продолжительности работ:

$$Y_i = \frac{T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (30)$$

где Y_i – удельное значение каждой работы в %;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

T_p – суммарная продолжительность темы, раб.дн.

Тогда техническую готовность темы Γ_i , можно рассчитать по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{i=1} T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (31)$$

где $\sum T_{pi}$ – нарастающая продолжительность на момент выполнения i -той работы.

Результаты расчетов приведены в таблице 9.

Таблица 9

Временные показатели проведения НИР

№ раб.	Исполнители	Продолжительность работ				
		t_{\min} чел- дн.	t_{\max} чел- дн	$t_{\text{ож}}$ чел- дн	T_p раб.дн	T_k кал.дн
1	Осипов С.П. Цзян Шань	1	3	1	1	2
2	Цзян Шань	7	9	7	7	14
3	Осипов С.П. Цзян Шань	4	10	4	4	8
4	Осипов С.П. Цзян Шань	11	15	11	11	22
5	Осипов С.П. Цзян Шань	3	5	3	3	6
6	Осипов С.П. Цзян Шань	2	3	2	2	4
7	Осипов С.П. Цзян Шань	5	7	5	5	10
8	Цзян Шань	3	5	3	3	6
9	Осипов С.П. Цзян Шань	4	9	4	4	8
10	Цзян Шань	12	15	12	12	24
ИТОГО						104

6.2.3 Построение графика работ

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (см. таблицу 10).

Таблица 10

Календарный график проведения НИР

Этапы	Вид работы	Исполнители	T_k	Февраль	Март	Апрель	Май
1	Составление и утверждение задания НИР	Осипов С.П. Цзян Шань	2				
2	Изучение методов цифровой радиогрaфии	Цзян Шань	14				
3	Календарное планирование работ	Осипов С.П. Цзян Шань	8				
4	Подготовка образцов для эксперимента	Осипов С.П. Цзян Шань	22				
5	Проведение экспериментов	Осипов С.П. Цзян Шань	6				
6	Снятие показаний	Осипов С.П. Цзян Шань	4				
7	Обработка полученных данных	Осипов С.П. Цзян Шань	10				
8	Анализ полученных результатов, выводы	Цзян Шань	6				
9	Оценка эффективности полученных результатов	Осипов С.П. Цзян Шань	8				
10	Составление пояснительной записки, Сдача результатов НИР	Цзян Шань	24				

 – руководитель,  – студент-дипломник.

В результате видно, что для выполнения исследования требуется всего 2 человека и работа выполняется в течении 104 дней.

6.2.4 Смета затрат на разработку проекта

Затраты представляют собой все производственные формы потребления денег и измеримых в денежном измерении материальных ценностей, которые служат непосредственной производственной целью.

Рассчитываем смету расходов, включая затраты на приобретение необходимого оборудования для разработки проекта и текущие расходы. Затраты, образующие себестоимость продукции (работ, услуг), группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх}} + I_{\text{прочие}} \quad (32)$$

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов и сырья, которые входят в состав вырабатываемой продукции, образуя ее основу, или являются необходимыми компонентами при изготовлении продукции.

Для проведения научно-исследовательской работы требуется рентгеновский аппарат Y-xlon, панель Perkin-Elmer 2048x2048, стол с вращением и вертикальным подъемом, ноутбук (таблица 11).

Срок полезного использования каждого вида оборудования:

– Рентгеновский аппарат Y-xlon, панель Perkin-Elmer 2048x2048, стол с вращением и вертикальным подъемом - по пятой группе (оборудование испытательное): 10 лет.

– Ноутбук - по третьей группе (техника электронно-вычислительная): 15 лет.

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Корректно при расчете затрат учитывать в году приобретения и в последующие

годы только ту часть затрат, которая происходит от старения основных фондов в каждом году.

Таблица 11

Материальные затраты

Материалы и оборудование	Ед. изм	Срок службы, год	Кол-во материала, ед	Цена за ед, руб	Затраты, руб
Рентгеновский аппарат Y-xlon	шт	10	1	10000000	10000000
Панель Perkin-Elmer 2048x2048	шт	10	1	5000000	5000000
Стол с вращением и вертикальным подъемом	шт	10	1	8000000	8000000
Ноутбук	шт	15	1	105000	105000
Итого:					23105000

Рассчитаем амортизацию оборудования техники $I_{ам.обор}$, по следующей формуле

$$I_{ам.обор} = \left(\frac{T_{исп.обор}}{365} \right) \times K_{обор} \times H_a, \quad (33)$$

где $T_{исп.обор}$ – время использования оборудования;

365 дней – количество дней в году;

$K_{обор}$ – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{с.с.обор}}, \quad (34)$$

где $T_{с.с.обор}$ – срок службы оборудования

$$I_{ам.аппар.} = \left(\frac{T_{исп.аппар.}}{365} \right) \cdot K_{аппар.} \cdot H_a = \left(\frac{6}{365} \right) \cdot 10000000 \cdot \frac{1}{10} = 16000 \quad (35)$$

$$I_{ам.пан.} = \left(\frac{T_{исп.пан.}}{365} \right) \cdot K_{пан.} \cdot H_a = \left(\frac{6}{365} \right) \cdot 5000000 \cdot \frac{1}{10} = 8000 \quad (36)$$

$$I_{ам.стол.} = \left(\frac{T_{исп.стол.}}{365} \right) \cdot K_{стол.} \cdot H_a = \left(\frac{6}{365} \right) \cdot 8000000 \cdot \frac{1}{10} = 12800 \quad (37)$$

$$I_{\text{ам.ноут.}} = \left(\frac{T_{\text{исп.ноут.}}}{365} \right) \cdot K_{\text{ноут}} \cdot H_a = \left(\frac{80}{365} \right) \cdot 105000 \cdot \frac{1}{15} = 1260 \quad (38)$$

$$I_{\text{ам.оборуд.}} = 16000 + 8000 + 12800 + 1260 = 38060 \quad (39)$$

Расчет заработной платы – заработная плата рассчитывается в соответствии с занятостью исполнителей, с учетом районного и тарифного коэффициентов исполнителей.

В состав затрат на оплату труда включаются:

- выплаты заработной платы за фактически выполненную работу;
- выплаты стимулирующего характера по системным положениям;
- выплаты по районным коэффициентам;
- компенсации за неиспользованный отпуск;
- другие виды выплат.

Примем, что полный фонд заработной платы ($\Phi_{\text{зп}}$):

$$\Phi_{\text{зп}} = 28000 \text{руб}, \quad (40)$$

Отчисления на социальные нужды выражаются в виде единого социального налога, который включает в себя: обязательные отчисления по установленным законодательством нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования.

Единый социальный налог – 30%.

Рассчитываем отчисления на социальные нужды ($I_{\text{соц.отч.}}$):

$$I_{\text{соц.отч.}} = ECH = 0,3 \cdot \Phi_{\text{зп}} = 0,3 \cdot 28000 = 8400 \quad (41)$$

Накладные расходы используют на следующее:

- затраты на текущий ремонт;
- амортизацию основных производственных фондов;
- затраты на охрану труда и пожарную безопасность.

Для проектных отделов накладные затраты составляют 200% от полного фонда заработной платы Тогда:

$$I_{\text{накл.расх.}} = 2 \cdot \Phi_{\text{зп}} = 2 \cdot 28000 = 56000 \text{руб}, \quad (42)$$

Прочие затраты – затраты, к которым относятся налоги, сборы, отчисления в специальные внебюджетные фонды, платежи по обязательному страхованию имущества, вознаграждения за изобретение и рационализаторские предложения, за подготовку кадров, оплата услуг связи и т.д. Эти затраты составляют 2% от всех издержек и вычисляются по формуле:

$$I_{\text{прочее}} = 0,02 \cdot (\Phi_{\text{зп}} + I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.оборуд}} + I_{\text{соц.отч.}} = \\ = 0,02 \cdot (28000 + 23105000 + 38060 + 8400) = 463589,2 \quad (43)$$

Рассчитываем себестоимость проекта ($K_{\text{проекта}}$).

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх}} + I_{\text{прочие}} \quad (44)$$

$$K_{\text{проекта}} = 23105000 + 38060 + 28000 + 8400 + 56000 + 463589,2 = 23699049,2$$

Рассчитываем плановые накопления (ПР). Стоимость проекта включает в себя 30% прибыли, таким образом:

$$PP = 0,3 \cdot K_{\text{проекта}} = 0,3 \cdot 23699049,2 = 7109714,76 \quad (45)$$

Рассчитываем стоимость проекта (Ц).

$$Ц = K_{\text{проекта}} + PP = 23699049,2 + 7109714,76 = 30808764 \quad (46)$$

Результаты расчётов сведены в таблицу 12.

Таблица 12

Смета затрат на научно-исследовательскую работу

Виды затрат	Обозначение	Сумма затрат, руб.
Амортизация оборудования	$I_{\text{ам,обор}}$	38060
Затраты на оплату труда	ЗП	28000
Отчисления на социальные нужды	$I_{\text{соц.отч}}$	8400
Накладные расходы	$I_{\text{накл.расх}}$	56000
Прочие затраты	$I_{\text{прочее}}$	463589,2
Себестоимость проекта	$K_{\text{проекта}}$	23699049,2
Плановые накопления (прибыль)	ПР	7109714,76
Стоимость проекта (цена)	Ц	30808764

Исходя из расчетов и полученных результатов приведенных в таблице 12, можно сделать вывод, что данная НИР входит в обозначенные бюджетные ограничения, так как стоимость проекта равная 30808764 рублей, меньше приблизительной суммы затрат равной 35000000 рублей.

6.3 Оценка целесообразности исследования

6.3.1 Оценка научно-технического уровня следования

Для определения научно - технического уровня проекта, его научной ценности, технической значимости и эффективности необходимо, рассчитать коэффициент научно-технического уровня (НТУ).

Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок. Суть метода состоит в присвоении каждому из признаков НТУ определенного числа баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик.

Формула для определения общей оценки:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i \quad (47)$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

Π_i – количественная оценка i – го признака.

Таблица 13

Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0,7
Теоретический уровень	0,5
Возможность реализации	0,5

Таблица 14

Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	Высокий НТУ

Таблица 15

Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Разработка нового метода	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ	8
Разработка численных экспериментов	6
Элементарный анализ результатов исследования	3

Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	5
Свыше 10 лет	3

Расчет НТУ:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i$$

где $k_1 = 0,8$; $k_2 = 0,5$; $k_3 = 0,5$; $\Pi_1 = 9$; $\Pi_2 = 6$; $\Pi_3 = 4$;

$$\text{НТУ} = 0,7*9+0,6*6+0,5*4 = 11,4.$$

По полученным значениям коэффициент научно-технического уровня (НТУ) можно сказать о достаточно высоком его уровне, его научной ценности, технической значимости и эффективности.

6.3.2 Оценка возможных рисков

Произведем оценку рисков, которое является одним из важнейших моментов при создании проекта. Учет рисков даст возможность избежать риски, вызванные опасными факторами, которые негативно отражаются на внедрении в жизнь проекта.

При оценке важности рисков оценивается вероятность их наступления (P_i). По шкале от 0 до 100 процентов: 100 – наступит точно, 75 – скорее всего наступит, 50 – ситуация неопределенности, 25 – риск скорее всего не наступит, 0 – риск не наступит. Оценка важности риска оценивается весовым коэффициентом (w_i). Важность оценивается по 10- балльной шкале b_i . Сумма весовых коэффициентов должна равняться единице. Оценка важности рисков приведена в таблицах 6.15–6.19.

Расчет рисков дает общую оценку в 31,458. Эта цифра говорит, что проект имеет право на жизнь, хотя и не лишен вероятных препятствий.

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены следующие задачи:

1) Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа, результат которого показал большой потенциал применения метода.

2) Определен полный перечень работ, проводимых при компьютерном моделировании. Определена трудоемкость проведения работ. Общая максимальная длительность выполнения работы составила 104 календарных дня.

3) Суммарный бюджет затрат НИР составил – 30808764рублей.

4) Определена целесообразность и эффективность научного исследования путем оценки научно-технического уровня проекта, а также оценки возможных рисков. В результате проводимое исследование имеет высокую значимость теоретического уровня и приемлемый уровень рисков.

Таблица 17

Социальные риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Низкая квалификация персонала	0	2	0,061	0
2	Непросвещенность предприятий о данном методе	50	4	0,168	8,928
3	Несоблюдение техники безопасности	25	6	0,23	6,25
4	Увеличение нагрузки на персонал	50	4	0,168	8,928
	Сумма		16	0,627	24,1

Таблица 18

Экономические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Инфляция	100	2	0,029	1,960
2	Экономический кризис	25	3	0,049	0,980
3	Непредвиденные расходы в плане работ	25	5	0,126	5,862
4	Сложность выхода на мировой рынок	75	6	0,136	10,29
	Сумма		16	0,34	19,92

Таблица 19

Технологические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Возможность поломки оборудования	25	6	0,24	5,25
2	Низкое качество поставленного оборудования	25	8	0,313	7,0357
	Сумма		14	0,553	12,2857

Научно-технические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Развитие конкурентных методов	50	5	0,135	8,936
2	Отсутствие результата в установленные сроки	25	6	0,123	6,25
3	Несвоевременное патентование	25	8	0,176	3,657
	Сумма		19	0,434	18,843

Таблица 21

Общие риски

№ п/п	Риски	b_i	w_i	$b_i \cdot w_i$
1	Социальные	16	0,627	10,03
2	Экономические	16	0,34	5,44
3	Технологические	14	0,553	7,742
4	Научно-технические	19	0,434	8,246
Итого				31,458

Следует отметить важность для проекта в целом, проведенных в данной главе работ, которые позволили объективно оценить эффективность проводимого научно-технического исследования.

7 Социальная ответственность

Цифровая радиография является одним из самых востребованных и интенсивно развивающихся методов неразрушающих испытаний разнообразных объектов. В настоящее время широко развивается цифровая рентгенография, отличительной особенностью которой является высокая производительность. Особенно широки области применения одной из разновидностей цифровой рентгенографии – метода дуальных энергий.

7.1 Производственная безопасность

7.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

В таблице 22 приведены элементы рентгеновского комплекса, которые представляют собой опасные и вредные факторы.

Таблица 22

Основные элементы рентгеновского комплекса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Обработка результатов измерений за компьютером	Воздействие излучений (электромагнитное и радиочастотное); Недостаточная освещенность рабочей зоны; Отклонение показателей микроклимата от нормальных; Влияние шума	Электрический ток	СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96; ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ; СНиП 23-05-95; СанПиН 2.2.4.548-96;
Работа с рентгеновской установкой	Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне		НРБ-99/2009; СП 2.6.1.2523-09

Рассмотрим выявленные факторы более подробно.

7.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

7.2.1 Воздействие неионизирующих излучений

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Воздействие ЭМП негативно сказывается на здоровье человека. Симптомы воздействия электромагнитного поля:

- утомляемость,
- раздражительность,
- нарушения сна,
- нарушения памяти и внимания

ПЭВМ являются источниками широкополосных электромагнитных излучений:

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

Таблица 23

Предельно допустимый уровень

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

Для уменьшения воздействия электромагнитного излучения на организм необходимо выполнять следующие меры:

- расстояние до монитора должно составлять не менее 50 см;
- не допускается использование мерцающего монитора (нужно использовать монитор с частотой кадров не менее 70 Гц);
- расположение верхнего края монитора должно располагаться на уровне глаз;
- не допускается освещение экрана прямыми яркими источниками;
- использование монитора с низким разрешением;
- необходимы регулярные перерывы в работе.

7.2.2 Электрический ток

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с комплексом в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор установки работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта частей рентгеновского комплекса;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей компьютера или установки);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности рентгеновского аппарата У-Х10п и связанного с ним комплекса сводятся к следующим действиям: отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы; вывешивание плакатов, указывающих место работы; заземление корпусов всех установок через нулевой провод; покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией; недоступность токоведущих частей аппаратуры (токоведущие части и элементы необходимо закрывать в непроводящие ток корпуса).

Предъявляются следующие технические требования к персональным компьютерам в лабораторных условиях:

- для электропитания компьютеров должна быть смонтирована отдельная сеть электроснабжения;
- не допускается использование оборудования без подключения к защитному заземлению, если такое подключение предусмотрено конструкцией оборудования;
- не допускается использование оборудования с открытыми корпусами, если это не является основным режимом работы оборудования;
- электрические розетки системы электропитания должны располагаться таким образом, чтобы кабели электропитания оборудования, расположенного на рабочем месте, не пересекали рабочее место (были направлены от места расположения пользователя).

7.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

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

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

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. Помещения со специальным оборудованием должны иметь естественное и искусственное освещение СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение». Для данного типа, относящихся к 3 разряду – высокая точность работ, минимальная освещенность в лаборатории должна составлять 300-500 лк. В следствие производственной необходимости работа в лаборатории производится без естественного освещения, данные условия согласованы с органами государственного надзора за охраной труда. Общее освещение лаборатории должно быть выполнено в виде сплошных или прерывистых линий светильников, которые располагаются в стороне от рабочих мест параллельно линии зрения работников. Допускается размещение линии светильников искусственного освещения локально над рабочими местами. Для общего освещения необходимо применять светильники с рассеивателями и зеркальными экранами сетками или отражателями, укомплектованные высокочастотными пускорегулирующими аппаратами. Применение светильников без рассеивателей и экранных сеток запрещается.

7.2.4 Отклонение показателей микроклимата от нормальных

Воздух рабочей зоны производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений и приведены в таблице 7.3.

7.2.5 Повышенный уровень шумов

Повышенный шум ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум в лаборатории создается работающими установками

кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. На рабочем месте лаборанта уровень шума не должен превышать 50 дБ.

Таблица 24

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

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

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека - не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция. (СНиП 2.09.04-87)

7.2.6 Повышенный уровень ионизирующего излучения

Защита персонала и гражданского населения в соответствии с нормативами СП 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) обеспечивается конструкцией радиационной защиты специально оборудованного помещения, в котором располагается экспериментальная рентгеновская установка. К работе с рентгеновским аппаратом допускается предварительно обученный персонал группы А и Б. Согласно НРБ–99/2009 существует 2 категории облучаемых лиц:

- персонал – лица, непосредственно работающие с техногенными источниками (группа А) и лица, которые находятся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б)

– население (все население, а также лица из персонала, вне сферы их производственной деятельности).

Допустимые значения эффективных доз для указанных категорий облучаемых лиц приведены в таблице 25.

Таблица 25

Допустимые пределы эффективных доз для категорий

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

Для инженеров лаборатории (персонал группы А) допустимая эффективная доза составляет 20 мЗв в год в среднем за последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год. Облучение эффективной дозой свыше 200 мЗв в течение года должно рассматриваться как потенциально опасное. Лица, подвергшиеся такому облучению, должны немедленно выводиться из зоны облучения и направляться на медицинское обследование. Последующая работа с источниками излучения этим лицам может быть разрешена только в индивидуальном порядке с учетом их согласия по решению компетентной медицинской комиссии.

Мероприятия для предотвращения облучения выше нормы. Перед проведением эксперимента персонал заблаговременно обязан покинуть помещение с рентгеновской установкой, плотно закрыть двери и убедиться, что все необходимые условия безопасности выполнены. Работа рентгеновского аппарата сопровождается звуковым сигналом с временным запасом 10 секунд,

таким образом, вероятность нахождения персонала в бункере во время работы по причине рассеянности сведена к минимуму. К названным мерам следует добавить использование индивидуального нагрудного дозиметра. Также для большей безопасности перед помещением со стороны входа выставляется знак «Осторожно, радиация» и ведется постоянное видеонаблюдение за помещением.

Для организации безопасной работы с рентгеновской установкой выделяют 4 принципа:

- уменьшение мощности источников до минимальных величин («защита количеством»);
- сокращение времени работы с источниками («защита временем»);
- увеличение расстояния от источников до работающих («защита расстоянием»);
- экранирование источников излучения материалами, поглощающими ионизирующее излучение («защита экранами»).

«Защита количеством» подразумевает под собой уменьшение мощности бетатрона для того, чтобы доза, полученная в результате работы, не превышала норм. Для реализации данного типа защиты, помимо ПО, в пультовой комнате установлен специальный пульт, который позволяет снижать до минимума уровень излучения. «Защита временем» основывается на тех же закономерностях, что и «защита количеством». Сокращая срок работы с комплексом, можно в значительной степени уменьшить дозы облучения работников лаборатории. При перегреве сотрудники лаборатории отключают установку, тем самым получая «защиту временем». «Защита расстоянием» подразумевает собой работу на максимальном удалении от источника излучения. Поглощенная доза обратно пропорциональна расстоянию, поэтому этот фактор очень важен. В лаборатории с досмотровым комплексом пультовая комната находится на удалении от бетатрона, и в стороне от основного пучка излучения.

«Защита экранами» – перекрытие основного пучка излучения материалами, которые будут поглощать часть излучения. Для изготовления экранов применяют различные материалы, а их толщина определяется мощностью излучения. Пультовая имеет стены со слоем свинца и большой толщиной бетона, а также свинцовую дверь, которая закрывается на время работы бетатрона. Свинец является одним из лучших экранов для поглощения излучения.

7.3 Экологическая безопасность

Вопрос об охране экологического состояния Земли в последние годы поднимается все активнее. Увеличение содержания углекислого газа в атмосфере, истощение озонового слоя и прочие загрязнения природы приводят к тому, что в природе изменяются привычные для данного периода условия обитания. Электроника и линейки не несут в себе большой экологической угрозы. Материалы, с которыми проводятся опыты, а именно: медь, алюминий, вольфрам – в последствие остаются для вторичного использования. Часть из них остается как основа для дальнейшего исследования, часть перерабатывается для последующего использования в других отраслях.

Согласно СП 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009), в случае возникновения аварии должны быть приняты практические меры для восстановления контроля над источником излучения и сведения к минимуму доз облучения, количества облученных лиц, радиоактивного загрязнения окружающей среды. При радиационной аварии или обнаружении радиоактивного загрязнения ограничение облучения осуществляется защитными мероприятиями, применимыми, как правило, к окружающей среде и (или) к человеку. Так как досмотровый комплекс является источником искусственно создаваемого излучения, для предотвращения аварийных ситуаций предусмотрено 3 ступени быстрого ручного отключения установки, после которого излучение мгновенно прекращается и опасность экологического загрязнения и вредных воздействий на человека исчезает.

7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Безопасность в чрезвычайных ситуациях нормируется ГОСТ Р 22.0.01-94 и ГОСТ Р 22.0.07-95. Вероятными чрезвычайными ситуациями, которые могут возникнуть при проведении данного научного исследования, являются:

- разрушение зданий и/или сооружений;
 - пожары;

7.5 Разрушение зданий и/или сооружений

Разрушение зданий и сооружений может быть следствием взрыва лабораторного оборудования по причине его неисправности, либо по причине отсутствия контроля за техническим состоянием конструкции. Первые признаки разрушения здания – это трещины, которые начинают проявляться в результате механического воздействия, вибрации оборудования и т.д.

При малейших признаках обрушения необходимо укрыться в местах, где маловероятно поражение обломками (дверные проемы, углы). Движение в полуразрушенном здании очень опасно, так как его разрушение может продолжиться. В связи с этим необходимо привлечь к себе внимание спасателей криками и ждать помощи. Запрещается возвращаться в разрушенное строение за имуществом. Безопасное расстояние от рушащегося здания – расстояние, равное его высоте.

7.6 Пожарная безопасность

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;

Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному).
- позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел.112.
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

7.7 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

7.7.1 Организационные мероприятия

1. К работе с радиоактивными веществами и ионизирующими излучениями допускаются лица, достигшие 18 лет, которые прошли специальное медицинское обследование состояния здоровья и были признаны по результатам этого обследования пригодными к указанной работе. Беременные женщины к таким работам не допускаются.

2. Перед началом работы с радиоактивными веществами и ионизирующими излучениями в зависимости от технического и научного уровня и характера работ каждый работник должен пройти специальное обучение и сдать соответствующий экзамен по технике радиационной безопасности. Проверяемый заносится в специальный журнал и отмечается после проверки знаний техники безопасности.

3. Все работы с радиоактивными веществами и ионизирующими излучениями должны проводиться в условиях строжайшего соблюдения правил радиационной безопасности и при наличии постоянного контроля со стороны лиц, ответственных за радиационную безопасность в данном учреждении.

4. В помещениях, где проводятся работы с радиоактивными веществами, запрещается:

- пребывание работников без необходимых средств индивидуальной защиты;
- хранение пищевых продуктов, табачных изделий, косметики, домашней одежды и других предметов, не имеющих прямого отношения к выполняемым работам;
- прием пищи, курение, пользование косметикой

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

7.7.2 Организация рабочей зоны

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. На рисунке 10 изображены зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

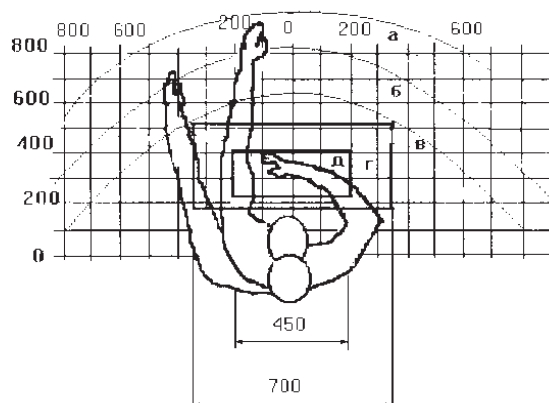


Рисунок 10 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:
 а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
 в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей персонального компьютера размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в шкафу для хранения – литература, которая не используется постоянно, но нужна при возникновении внештатных ситуаций.

Заключение

Разработана математическая модель формирования цифровых радиографических изображений и исходных проекций применительно к цифровой радиографии и компьютерной томографии крупногабаритных нефтегазовых труб и трансформации проекций в распределения массовых толщин. Приведены примеры имитационного моделирования цифровых радиографических изображений и единичных проекций стальных труб с диаметром от 530 мм до 1420 мм с вариацией разрядности аналого-цифровых преобразователей и числа фотонов, падающих на фронтальную поверхность детектора многоканальной системы регистрации тормозного излучения. Доказана необходимость корректного подбора этих параметров. Проиллюстрирована возможность оценки распределения плотности по сечению трубы на основе обратного преобразования Абеля для случая узкого расходящегося пучка тормозного излучения. Рассмотрены вопросы, связанные с технической реализуемостью методов цифровой радиографии и компьютерной томографии применительно к контролю крупногабаритных труб и касающиеся оценки общего времени сканирования и необходимой разрядности аналого-цифровых преобразователей. Даны рекомендации относительно согласования диапазонов изменения аналоговых и цифровых сигналов. Полученные результаты позволяют доказать или опровергнуть реалистичность задач проектирования систем цифровой радиографии и компьютерной томографии для контроля крупногабаритных нефтегазовых труб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Thomas J., Loiano G., Daniilidis K., Kumar V. Visual servoing of quadrotors for perching by hanging from cylindrical objects // IEEE robotics and automation letters. – 2016. – V. 1. – No. 1. – P. 57–64.
2. Bolomey J.C. Recent European developments in active microwave imaging for industrial, scientific, and medical applications // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1989. – V. 37. – No. 12. – P. 2109-2117.
3. Ider Y.Z., Gencer N.G., Atalar E., Tosun H. Electrical impedance tomography of translationally uniform cylindrical objects with general cross-sectional boundaries // IEEE transactions on medical imaging. – 1990. – V. 9. – No. 1. – P. 49–59.
4. Shmelev A.N., Kozhahmet B.K. Use of molybdenum as a structural material of fuel elements for improving the safety of nuclear reactors // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – V. 781. – No. 1. – No. article 012022.
5. Alobaidi W.M., Al-Rizzo H.M., Sandgren E. NDT applied to the detection of defects in oil and gas pipes: a simulation-based study // ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – American Society of Mechanical Engineers, 2015. – P. V02BT02A008-V02BT02A008.
6. Chotas H.G., Dobbins III J.T., Ravin C.E. Principles of digital radiography with large-area, electronically readable detectors: a review of the basics // Radiology. – 1999. – V. 210. – No. 3. – P. 595–599.
7. Martz H.E., Logan C.M., Schneberk D.J., Shull P.J. X-ray Imaging: Fundamentals, Industrial Techniques and Applications, Boca Raton, FL (USA): CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
8. Yenumula L., Acharya R.V., Lingade B.M., Borgohain A., Maheshwari N.K., Kumar U., Dash A. Radiographic evaluation of gas tungsten arc welded joints used in nuclear applications by X-and gamma-rays // NDT & E International. – 2019. – V. 102. – P. 144–152.
9. Shvedunov V.I., Alimov A.S., Ermakov A.N., Kamanin A.N., Khankin V.V., Kurilik A.S., Yurov D.S. Electron accelerators design and construction at Lomonosov

Moscow State University // Radiation Physics and Chemistry. Volume 159, June 2019, Pages 95-100

10. Birowosuto M.D., Cortecchia D., Drozdowski W., Brylew K., Lachmanski W., Bruno A., Soci C. X-ray scintillation in lead halide perovskite crystals // Scientific reports. – 2016. – V. 6. – No. article 37254.

11. Schiffer H.W., Kober T., Panos E. World energy council's global energy scenarios to 2060 // Zeitschrift für Energiewirtschaft. 2018. Vol. 42. No. 2. P. 91—102.

12. Данилина М. В. Нефтегазовый комплекс России-ведущий источник формирования доходов федерального бюджета // Региональная экономика: теория и практика. 2007. № 17. С. 30—41.

13. Черняева Е.В., Галкин Д.И., Бигус Г.А., Мерсон Д.Л. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля состояния основного металла и сварных соединений трубопроводов, работающих в условиях малоциклового усталости // Сварка и диагностика. 2010. № 2. С. 50—56.

14. Shafeek H.I., Gadelmawla E.S., Abdel-Shafy A.A., Elewa I.M. Automatic inspection of gas pipeline welding defects using an expert vision system // NDT & E International. 2004. Vol. 37. No. 4. P. 301—307.

15. Субботин В.А., Колотилев Ю.В., Смирнова В.Ю. Неразрушающий контроль и техническая диагностика состояния объектов трубопроводного транспорта углеводородов // Технология металлов. 2018. № 2. С. 37—42.

16. Зайцева С.П. Современные направления обновления и управления инфраструктурой нефтепроводов // Успехи современного естествознания. № 6. 2016. С. 150—154.

17. Rostron P. Critical review of pipeline scale measurement technologies // Indian Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 11. P. 1—18. DOI: 10.17485/ijst/2018/v11i17/121459.

18. Boaretto N., Centeno T.M. Automated detection of welding defects in pipelines from radiographic images DWDI // NDT & E International. 2017. Vol. 86. P. 7—13.

19. Konar R., Mician M., Bucha M., Vrzgula P., Hlavaty I. Digital radiography corrosion mapping on gas pipelines // *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2017. Vol. 19. No. 2A. P. 101—105.
20. Cheng C., Jia W.B., Hei D.Q., Geng S.Q., Wang H.T., Xing L.T. Determination of thickness of wax deposition in oil pipelines using gamma-ray transmission method // *Nuclear Science and Techniques*. 2018. Vol. 29. No. 8. No. article 109.
21. Moreira E., Rabello J.B., Pereira M., Lopes R., Zscherpel U. Digital radiography using digital detector arrays fulfills critical applications for offshore pipelines // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2010. Vol. 2010. No. 1. No. article 894643.
22. Бархатов А.Ф. Системы цифровой радиографии для контроля качества сварных швов магистральных нефтепроводов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2013. № 4. С. 59—63.
23. Жуков А.Д., Галкин Д.И., Иванайский Е.А. К вопросу о замене радиографической плёнки на цифровые детекторы // *Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение»*. 2018. № 1 (118). С. 47—56.
24. Кудояров Р.У., Багин А.С., Могильнер Л.Ю. Повышение выявляемости дефектов сварных швов труб большого диаметра в условиях заводов изготовителей // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2016. № 4. С. 78—83.
25. Riis N.A.B., Frøsig J., Dong Y., Hansen P.C. Limited-data x-ray CT for underwater pipeline inspection // *Inverse Problems*. 2018. Vol. 34. No. 3. No. article 034002.
26. Kim J., Jung S.H., Moon J., Park J.G., Jin J., Cho G. Development of transportable gamma-ray tomographic system for industrial application // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2012. Vol. 693. P. 203—208.

27. Quang N.H., Van Dao P., Duy B.T., Van Chuan N. A third generation gamma-ray industrial computed tomography systems for pipeline inspection // *Journal Technology*. 2015. Vol 77. No. 17. P. 49—53.
28. ГОСТ 31447-2012. Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2013 —31 с.
29. Haith M.I., Ewert U., Hohendorf S., Bellon C., Deresch A., Huthwaite P., Zscherpel U. Radiographic modelling for NDE of subsea pipelines // *NDT & E International*. 2017. Vol. 86. P. 113—122.
30. Hsieh J. *Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances*. Bellingham, WA: SPIE, 2009.
31. Boas F. E., Fleischmann D. CT artifacts: causes and reduction techniques // *Imaging in Medicine*. 2012. Vol. 4. No. 2. P. 229—240.
32. Xu F., Helfen L., Baumbach T., Suhonen H. Comparison of image quality in computed laminography and tomography // *Optics Express*. 2012. Vol. 20. No. 2. P. 794—806.
34. Goldman L.W. Principles of CT: radiation dose and image quality // *Journal of nuclear medicine technology*. 2007. Vol. 35. No. 4. P. 213—225.
35. Brooks R.A., Di Chiro G. Theory of image reconstruction in computed tomography // *Radiology*. 1975. Vol. 117. No. 3. P. 561—572.
36. Coric S., Leeser M., Miller E., Trepanier M. Parallel-beam back projection: an FPGA implementation optimized for medical imaging // *Proceedings of the 2002 ACM/SIGDA tenth international symposium on Field-programmable gate arrays*. ACM, 2002. P. 217—226.
37. Miller J.D., Lin C.L., Cortes A.B. A review of X-ray computed tomography and its applications in mineral processing // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1990. Vol. 7. No. 1. P. 1—18.
38. Осипов С.П., Чахлов С.В., Кайролапов Д.У., Сиротьян Е.В. Численное моделирование радиографических изображений — основа корректного

проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // Дефектоскопия. — 2019. № 2. С. 43—55.

39. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Li S., Sun X., Zheng J., Hu X., Zhang G. Physical and technical restrictions of materials recognition by the dual high energy X-ray imaging // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. No. 23. P. 13127—13136.

40. Ziegler C.M., Franetzki M., Denig T., Mühling J., Hassfeld S. Digital tomosynthesis—experiences with a new imaging device for the dental field // Clinical oral investigations. 2003. Vol. 7. No. 1. P. 41—45.

41. Van der Linden V., Van de Castele E., Thomas M.S., De Vos A., Janssen E., Janssens K. Analysis of micro computed tomography images; a look inside historic enameled metal objects // Applied Physics A. 2010. Vol. 98. No. 2. P. 385—392.

42. Gjestebj L., De Man B., Jin Y., Paganetti H., Verburg J., Giantsoudi D., Wang G. Metal artifact reduction in CT: where are we after four decades? // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 5826—5849.

43. Лихачев А.В. Новый метод решения задачи томографии при наличии непрозрачного включения // Вычислительные методы и программирование. 2017. Т. 18. № 2. С. 129—137.

44. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: Основы реконструктивной томографии. Пер. с англ. — М.: Мир, 1983—352 с.

45. Nedavnii O.I., Osipov S.P., Sidulenko O.A. Choice of the compensating filter profile in images restoration for objects with annular structures in X-ray computational tomography // Russian journal of nondestructive testing. 2002. Vol. 38. No. 4. P. 261—265.

46. Stribeck N., Nöchel U., Almendárez Camarillo A. Scanning microbeam X-ray scattering of fibers analyzed by one-dimensional tomography // Macromolecular Chemistry and Physics. 2008. Vol. 209. no. 19. P. 1976—1982. DOI: 10.1002/macp.200800242

77. Veera U.P. Gamma ray tomography design for the measurement of hold-up profiles in two-phase bubble columns // *Chemical Engineering Journal*. 2001. Vol. 81. no. 1. P. 251—260. DOI: 10.1016/S1385-8947(00)00202-3
48. Osipov S., Chakhlov S., Batranin A., Osipov O., Kytmanov J. Theoretical study of a simplified implementation model of a dual-energy technique for computed tomography // *NDT & E International*. 2018. Vol. 98. P. 63—69.
49. Ito D., Ito K., Saito Y., Aoyagi M., Matsuba K., Kamiyama K. Estimation of porosity and void fraction profiles in a packed bed of spheres using X-ray radiography // *Nuclear Engineering and Design*. 2018. Vol. 334. P. 90—95.
50. Fukuda T., Awatsuji Y., Xia P., Kakue T., Nishio K., Matoba O. Review of three-dimensional imaging of dynamic objects by parallel phase-shifting digital holography // *Optical Engineering*. 2018. Vol. 57. No. 6. No. article 061613.
51. Zschornack G.H. *Handbook of X-ray data*. Springer Science & Business Media, 2007. 968 p.
52. Chakhlov S.V., Kasyanov S.V., Kasyanov V.A., Osipov S.P., Stein M.M., Stein A.M., Xiaoming S. Betatron application in mobile and relocatable inspection systems for freight transport control // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2016. Vol. 671. No. 1. No. article 012024.
53. Cao J., Jiang C.Y., Zhao Y.F., Yang Q.W., Yin Z.J. A novel X-ray tube spectra reconstruction method based on transmission measurements // *Nuclear Science and Techniques*. 2016. Vol. 27. No. 2. 45 p.
54. Mahfouz M.R., Kuhn M.J., To G., Fathy A.E. Integration of UWB and wireless pressure mapping in surgical navigation // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2009. Vol. 57. No. 10. P. 2550—2564.
55. Dipova N. Automated strain measurements in uniaxial testing via computer vision // *Geotechnical Testing Journal*. 2018. Vol. 42. No. 4. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170349>.
56. Sommer M., Jahn A., Henniger J. A new personal dosimetry system for HP (10) and HP (0.07) photon dose based on OSL-dosimetry of beryllium oxide // *Radiation Measurements*. 2011. Vol. 46. No. 12. P. 1818—1821.

57. URL: https://www.varian.com/sites/default/files/resource_attachments/SIPspecMI.pdf
58. URL: <http://www.niiefa.spb.su/site/left/accelerat/electrons/defectoscop/?lang=ru>
59. Hahn S., Elphic R., Murphy T., Hodgson M., Byrd R., Longmire J., Meier M. A validation payload for space and atmospheric nuclear event detection // 2002 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. IEEE, 2002. Vol. 1. P. 71—77.
60. Zacher A.R. A wide-range logarithmic charge digitizer // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1993. Vol. 40. No. 5. P. 307—316.
61. Способ аналого-цифровой обработки сигнала радиометрического датчика: пат. 2386209 Рос. Федерация: МПК Н03М 1/04 / В.П. Карих, А.В. Вьюшков, Г.А. Привалов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный научно-производственный центр «Алтай». № 2009100582/09; заявл. 11.01.2009; опубл. 10.04.2010, Бюл. №10. — 15 с.
62. ГОСТ 12.0.003-74 (СТ СЭВ 790-77). «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.»
63. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.»
64. ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности.»
65. Правила устройства электроустановок, ПУЭ, утвержденные Министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.
66. ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т «Пожарная безопасность. Общие требования.»
67. СП 9.13130.2009 «Техника Пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации.»
68. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
69. СНиП П-12-77. « Защита от шума »
70. СНиП 2.04. 05-91. « Отопление, вентиляция и кондиционирование»
71. ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) ССБТ. « Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты »

72. ГОСТ 12.0.004–90 ССБТ. « Обучение работающих безопасности труда »
73. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. « Защитное заземление, зануление »
74. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. « Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов »
75. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. «Вибрационная безопасность. Общие требования »
76. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12. 2014) «Об организации сбора, вывоза, утилизации, и переработки бытовых и промышленных»
77. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 « Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств »
78. ГОСТ Р 50571.3-94 «Электроустановки зданий. Часть 4. Защита от поражения электрическим током».

Приложение

**Программа для имитационного моделирования цифровых
радиографических изображений (проекций) крупногабаритных труб**

Выпускная квалификационная работа Цзян Шань

Моделирование цифровых радиографических изображений объекта контроля (ОК)

Блок исходных данные

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

Эффективные атомные номера и молярные массы в файле MZ.txt

Первый столбец - эффективные атомные номера

Второй столбец - молярные массы

```
MZ := READPRN("MZ.txt")
```

Ввод данных по материалам: файл 82.txt находится в директории программы

```
C := READPRN("82.txt")
```

```
i0 := cols(C) - 1 = 80
```

```
ii0 := i0 - 1
```

```
j := 0..126 i := 0..ii0
```

```
Zei := MZi,0 Mzi := MZi,1
```

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

В базах данных энергии от максимума к минимуму, делает перестановку от минимума до максимума

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

Блок аппроксимации массовых коэффициентов ослабления

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

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

Сцинтиллятор CdWO₄ плотность $\rho_{sc} := 7.9$

МКО сцинтиллятора $msc(x) := \frac{mas(x, 73) \cdot Mz_{73} + mas(x, 47) \cdot Mz_{47} + 4 \cdot mas(x, 7) \cdot Mz_7}{Mz_{73} + Mz_{47} + 4 \cdot Mz_7}$

Эффективность регистрации $\xi(x, hsc) := 1 - e^{-msc(x) \cdot \rho_{sc} \cdot hsc}$

Данные для расчётов

Энергетический спектр (формула Крамерса) $ff(emax, x) := \frac{emax - x}{x}$

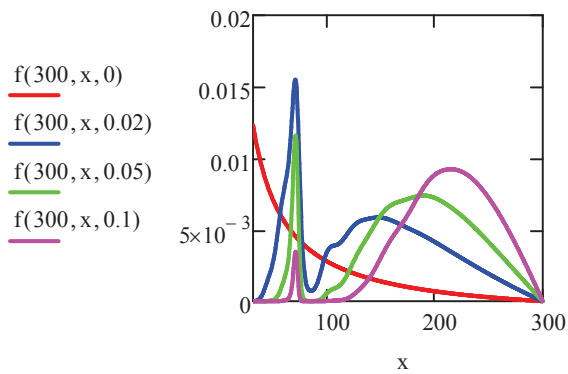
Предварительная фильтрация рентгеновского излучения

$z_f := 74$ $\rho_f := 18.4$ Фильтр из вольфрама толщиной hf

$$sf(emax, hf) := \int_{10}^{emax} ff(emax, x) \cdot e^{-mas(x, Ze_{z_f-1}) \cdot \rho_f \cdot hf} dx$$

$$Ze_{z_f-1} = 74$$

$$f(emax, x, hf) := \frac{ff(emax, x) \cdot e^{-mas(x, Ze_{z_f-1}) \cdot \rho_f \cdot hf}}{sf(emax, hf)}$$



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

Материал ОК - сталь 4

$k_0 := 10$

C	0,18 - 0,27	Сталь Ст4пс
Si	0,05 - 0,15	
Mn	0,4 - 0,7	
Ni	до 0,3	
S	до 0,05	
P	до 0,04	
Cr	до 0,3	
N	до 0,008	
Cu	до 0,3	
As	до 0,08	
Fe	~98	

$$\alpha \alpha := 0.01 \cdot \begin{pmatrix} 0.27 \\ 0.15 \\ 0.7 \\ 0.3 \\ 0.05 \\ 0.04 \\ 0.3 \\ 0.008 \\ 0.3 \\ 0.08 \end{pmatrix} \cdot zoc := \begin{pmatrix} 6 \\ 14 \\ 25 \\ 28 \\ 16 \\ 15 \\ 24 \\ 7 \\ 29 \\ 33 \\ 26 \end{pmatrix} \quad k := 0..k_0 - 1$$

$$\alpha_k := \alpha \alpha_k$$

$$\alpha_{k0} := 1 - \sum_{k=0}^{k0-1} \alpha_k$$

$$\text{masoc}(x) := \sum_{k=0}^{k0} (\alpha_k \cdot \text{mas}(x, \text{zoc}_k - 1))$$

	0
0	0.0027
1	0.0015
2	0.007
3	0.003
4	0.0005
5	0.0004
6	0.003
7	0.0001
8	0.003
9	0.0008
10	0.978

n_0 количество фотонов на фронтальную поверхность единичного детектора

$$Sf(\text{emax}, hf) := \int_5^{\text{emax}} f(\text{emax}, x, hf) dx$$

$$N(\text{emax}, \rho H, \text{hsc}, n_0, hhf) := n_0 \cdot \frac{\int_5^{\text{emax}} f(\text{emax}, x, hhf) \cdot e^{-\text{masoc}(x) \cdot \rho H} \cdot \varepsilon(x, \text{hsc}) dx}{Sf(\text{emax}, hhf)}$$

$$I(\text{emax}, \rho H, \text{hsc}, n_0, hhf) := N(\text{emax}, \rho H, \text{hsc}, n_0, hhf) \cdot \frac{\int_5^{\text{emax}} x \cdot f(\text{emax}, x, hhf) \cdot e^{-\text{masoc}(x) \cdot \rho H} \cdot \varepsilon(x, \text{hsc}) dx}{\int_5^{\text{emax}} f(\text{emax}, x, hhf) \cdot e^{-\text{masoc}(x) \cdot \rho H} \cdot \varepsilon(x, \text{hsc}) dx}$$

Разрядность АЦП

$k := 24$

$Co := 1.2$ коэффициент от переполнения

$$\Delta(\text{emax}, \text{hsc}, n_0, hhf) := \frac{Co \cdot I(\text{emax}, 0, \text{hsc}, n_0, hhf)}{2^k - 1}$$

$$\frac{I(300, 0, 0.1, 10^6, 0.01) \cdot Co}{\Delta(300, 0.1, 10^6, 0.01)} = 1.6777 \times 10^7$$

Максимальные энергии рентгеновского излучения

$e1 := 9000$

Калибровочные измерения количество ступеней в эталоне $n\rho := 20$
 Максимальная толщина ОК в мм $h_{\max\text{mm}} := 400$ плотность материала ОК $\rho_{\text{ос}} := 7.56$
 Переход всантиметры $h_{\max} := \frac{h_{\max\text{mm}}}{10}$ массовая толщина $\rho h_{\max} := h_{\max} \cdot \rho_{\text{ос}}$
 $i\rho := 0..n\rho$
 толщина ступени $h_{\rho h} := \frac{\rho h_{\max}}{n\rho}$ $n0 := 1 \times 10^9$ $\eta := 0.000000001$
 $\rho h_{i\rho} := h_{\rho h} i\rho$ $hsc := 0.6$ $hff := 0.1$ $\Delta D := \Delta(e1, hsc, n0, hff)$

$I1_{i\rho} := I(e1, \rho h_{i\rho}, hsc, n0, hff)$ $N1_{i\rho} := N(e1, \rho h_{i\rho}, hsc, n0, hff)$

Вычисление коэффициентов аппроксимации

Задание сплайнов

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

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

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

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

Оцифровка аналоговых сигналов

$ID1_{i\rho} := \text{floor}\left(\frac{I1_{i\rho}}{\Delta D}\right)$ $\Delta D = 25976.3503$

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

Толщина ОК в длинах свободного пробега

Оценка толщины ОК в дсп по цифровому сигналу

η защищает от логарифмирования нуля

$y_{i\rho} := -\ln\left(\frac{I1_{i\rho}}{I1_0}\right)$

$y_{d,i\rho} := \max\left(0, -\ln\left(\frac{ID1_{i\rho}}{ID1_0} + \eta\right)\right)$

$ID1_0 \cdot Co = 1.6777 \times 10^7$

$vIy := \text{cspline}(y_d, \rho h)$

$RD(y1) := \text{interp}(vIy, y_d, \rho h, y1)$

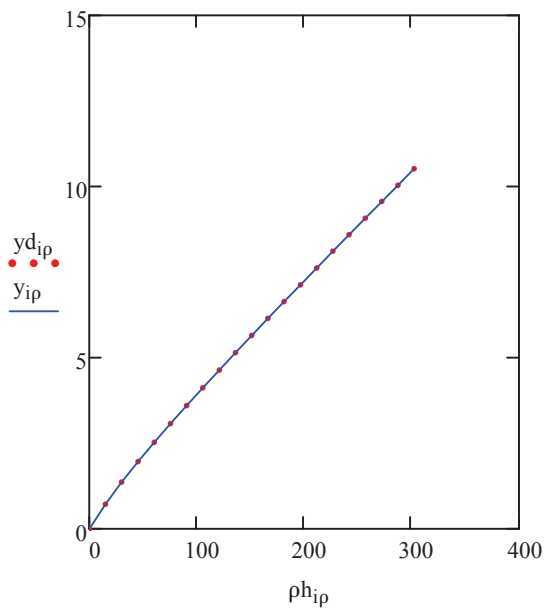
Предельная толщина ОК в дсп для данного АЦП

$y_{\max} := \ln\left[\frac{(2^k - 1)}{Co}\right] = 16.4532$

Реальная максимальная толщина ОК в дсп

$\max(y) = 10.5281$

Условие $y_{\max} > \max(y)$ соблюдается!!!!



Максимальная энергия рентгеновского излучения

$$\epsilon_1 = 9000 \text{ кэВ}$$

Диаметр трубы в мм $DT := 530$

Регистратор рентгеновского излучения - панельный детектор Perkin Elmer

Размеры панельного детектора в мм $A := DT + 200$ $B := 40$

Физический размер пикселя в мм $a := 0.5$ $b := 0.5$

Количество пикселей $M := \text{floor}\left(\frac{A}{a}\right)$ $N := \text{floor}\left(\frac{B}{b}\right)$ $M = 1460$
 $N = 80$

Размер A свяжем с индексом ix, а B с iy
 $ix := 0..M$ $iy := 0..N$

Объект контроля труба из стали толщиной стенки в мм $H := 40$

Плотность материала ОК $\rho_{oc} = 7.56$

Массовая толщина $\rho_{Hoc} := \rho_{oc} \cdot H$

ОК расположен вблизи панели, оси объекта и панели совпадают

$$A_{oc} := \frac{A - DT}{2} \quad B_{oc} := 0$$

Размеры тени ОК в пикселях $M_{oc} := \text{floor}\left(\frac{A_{oc}}{a}\right)$ $N_{oc} := \text{floor}\left(\frac{B_{oc}}{b}\right)$

$M_{oc} = 200$ $N_{oc} = 0$

Положение тени ОК относительно угла панельного детектора в мм

$X_{oc} := \frac{A_{oc}}{2}$ $Y_{oc} := \frac{B_{oc}}{2}$

Смещение тени ОК в пикселях $M_x := \text{floor}\left(\frac{X_{oc}}{a}\right)$ $N_y := \text{floor}\left(\frac{Y_{oc}}{b}\right)$

Внутри сварного шва пора в виде сферы диаметром в мм

$D_{mm} := 5$

Переведём в см $D := \frac{D_{mm}}{10}$

Координаты центра поры в мм $X_D := \frac{A}{2}$ $Y_D := \frac{B}{2}$ $Z_D := H \cdot \frac{10}{2}$

Координата z связана с центром ОК

Граница сферической полости $(x - X_D)^2 + (y - Y_D)^2 + (z - Z_D)^2 = \frac{D_{mm}^2}{4}$

Распределение лучевой толщины ОК по плоскости изображения в см $H(x,y)$ в дискретах $H_{ix,iy}$

Координаты центров пикселей $x_{p_{ix}} := ix \cdot a + \frac{a}{2}$ $y_{p_{iy}} := iy \cdot b + \frac{b}{2}$

Вначале распределение толщин без поры, используем метод замещающих объёмов

$$H_{oc1}(x, y) := \begin{cases} \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{DT^2}{4} - \left(x - \frac{A}{2}\right)^2}}{10} & \text{if } \left[\frac{DT^2}{4} - \left(x - \frac{A}{2}\right)^2 \right] \geq 0 \wedge (0 \leq y \leq B) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$H_{oc2}(x, y) := \begin{cases} \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{(DT - 2 \cdot H)^2}{4} - \left(x - \frac{A}{2}\right)^2}}{10} & \text{if } \left[\frac{(DT - 2 \cdot H)^2}{4} - \left(x - \frac{A}{2}\right)^2 \right] \geq 0 \wedge (0 \leq y \leq B) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Hoc}(x, y) := \text{Hoc1}(x, y) - \text{Hoc2}(x, y)$$

Описание сферической поры

$$\text{Hp}(x, y) := \begin{cases} \frac{\sqrt{\frac{\text{Dmm}^2}{4} - [(x - \text{XD})^2 + (y - \text{YD})^2]}}{10} & \text{if } [(x - \text{XD})^2 + (y - \text{YD})^2] \leq \frac{\text{Dmm}^2}{4} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Результирующее распределение массовой толщины по x, y

$$\rho_{\text{HR}}(x, y) := (\text{Hoc}(x, y) - \text{Hp}(x, y)) \cdot \rho_{\text{oc}}$$

$$\rho_{\text{H}_{ix, iy}} := \rho_{\text{HR}}(x_{p_{ix}}, y_{p_{iy}})$$

$$\text{Ioc}_{ix, iy} := \begin{cases} \text{res} \leftarrow 0 & \text{if } \text{NN1}(\rho_{\text{H}_{ix, iy}}) < 1 \\ \text{res} \leftarrow \text{II1}(\rho_{\text{H}_{ix, iy}}) & \text{if } \text{NN1}(\rho_{\text{H}_{ix, iy}}) \geq 1 \\ \text{res} & \end{cases}$$

$$\text{NOC}_{ix, iy} := \begin{cases} \text{res} \leftarrow 0.1 & \text{if } \text{NN1}(\rho_{\text{H}_{ix, iy}}) < 0.1 \\ \text{res} \leftarrow \text{NN1}(\rho_{\text{H}_{ix, iy}}) & \text{if } \text{NN1}(\rho_{\text{H}_{ix, iy}}) \geq 0.1 \\ \text{res} & \end{cases}$$

$$\alpha\alpha\alpha := 0.00001$$

$$\text{ID11}_{ix, iy} := \text{floor} \left[\frac{\max(0, \text{Ioc}_{ix, iy}) \cdot \max \left[\alpha\alpha\alpha, 1 + \frac{(\sqrt{-2 \cdot \ln(\text{rnd}(1))}) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{rnd}(1))}{\sqrt{\text{NOC}_{ix, iy}}} \right]}{\Delta D} \right]$$

$$\text{ID1}_{ix, iy} := \begin{cases} 2^k - 1 & \text{if } \text{ID11}_{ix, iy} > 2^k - 1 \\ \text{ID11}_{ix, iy} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$yC := 10$$

$$iyC := \text{floor} \left(\frac{yC}{a} \right)$$

$$\text{MID1} := \text{floor} \left(\frac{\text{II1}(0)}{\Delta D} \right)$$

$$\text{PY}_{ix, iy} := -\ln \left(\frac{\text{ID1}_{ix, iy} + \eta}{\text{MID1}} \right)$$

$$Y_{ix, iy} := \max(0, \text{RD}(PY_{ix, iy}))$$

$$\max(Y) = 211.4127$$

$$DT = 530$$

$$\text{MID1} \cdot \text{Co} = 1.6777 \times 10^7$$

$$\text{mip} := \min(\rho H)$$

$$\text{map} := \max(\rho H)$$

$$Y_{\min} := \min(Y)$$

$$Y_{\max} := \max(Y)$$

$$Y_{\max} = 211.4127$$

$$\text{mip} := 0$$

$$P_{ix, iy} := 255 - \text{floor}\left(255 \cdot \frac{Y_{ix, iy} - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}\right)$$

$$PP_{ix, iy} := 255 - \text{floor}\left(255 \cdot \frac{\rho H_{ix, iy} - \text{mip}}{\text{map} - \text{mip}}\right)$$

$$\begin{pmatrix} r_{iy, ix} \\ g_{iy, ix} \\ b_{iy, ix} \end{pmatrix} := \begin{cases} \begin{pmatrix} P_{ix, iy} \\ P_{ix, iy} \\ P_{ix, iy} \end{pmatrix} & \text{if } Y_{ix, iy} \leq \rho H_{\max} \\ \begin{pmatrix} 255 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } Y_{ix, iy} > \rho H_{\max} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} rr_{iy, ix} \\ gg_{iy, ix} \\ bb_{iy, ix} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} PP_{ix, iy} \\ PP_{ix, iy} \\ PP_{ix, iy} \end{pmatrix}$$

$$\text{pr}_{ix} := \begin{cases} yy \leftarrow \frac{\sum_{iy=0}^{N-1} Y_{ix, iy}}{N} \\ \text{res} \leftarrow yy & \text{if } yy \geq 0.001 \\ \text{res} \leftarrow 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{CI2} := \text{augment}(r, g, b)$$

$$\text{WRITERGB}(\text{"IDC2.bmp"}) := \text{CI2}$$

$$\text{CI1} := \text{augment}(rr, gg, bb)$$

$$\text{WRITERGB}(\text{"IDC1.bmp"}) := \text{CI1}$$



"IDC2"

$$k = 24$$

$$n0 = 1 \times 10^9$$

$$H = 40$$

```
N := M  
ir := 0..N  
RRir :=  $\frac{-A}{2} + ir \cdot a$ 
```

```
file := concat("a=", num2str(a), "D=", num2str(DT), "H=", num2str(H), ".txt")
```

```
DT = 530
```

```
SI := augment(RR, pr)
```

```
file = "a=0.5D=530H=40.txt"
```

```
WRITEPRN(file) := SI
```

```
WRITEPRN("FILE.txt") := (file)
```