

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

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки приборостроение
Кафедра физических методов и приборов контроля качества

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

УДК 620.179.152:621.86.065

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Жумабекова Шынар Талгаткызы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
вед. научн. сотр., лаборатории №40 ИНК ТПУ	Осипов Сергей Павлович	К.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. МЕН	Чистякова Наталья Олеговна	К.Э.Н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Анищенко Юлия Владимировна	К.Т.Н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. ФМПК	Суржиков Анатолий Петрович	доктор физ.– мат. наук		

Томск – 2016 г.

Планируемые результаты обучения

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

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
	деятельности при разработке средств измерения и контроля, используя стандартные пакеты и средства автоматизированного проектирования в приборостроении..	международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Умение профессионально эксплуатировать современное оборудование и приборы в соответствии с целями магистерской программы, организовывать технологическую подготовку производства приборных систем различного назначения и принципа действия, разрабатывать и внедрять новые технологические процессы с использованием гибких САПР и оценивать их экономическую эффективность и инновационные риски при их внедрении.	Требования ФГОС (ПК–15,ПК–4,ПК–17), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Способность проектировать приборные системы и технологические процессы с использованием средств САПР и опыта разработки конкурентоспособных изделий; осуществлять проектную деятельность в профессиональной сфере на основе системного подхода.	Требования ФГОС (ПК–10,ПК–7), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Умение разрабатывать методики проведения теоретических и экспериментальных исследований по анализу, синтезу и оптимизации методов измерения контроля и диагностики, используемых в приборостроении; способность разработать и проводить оптимизацию натуральных экспериментальных исследований приборных систем с учётом критериев надёжности; использовать результаты научно–исследовательской деятельности и пользоваться правами на объекты интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ПК–16,ПК–23,ПК–25) ПК–2,26,27,28), Критерий 5 АИОР (п.2.3, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Умение организовывать современное метрологическое обеспечение технологических процессов производства приборных систем и разрабатывать новые методы контроля качества выпускаемой продукции и технологических процессов; решать экономические и организационные задачи технологической подготовки приборных систем и выбирать системы обеспечения экологической безопасности в производстве и при технологическом контроле.	Требования ФГОС (ПК–18; ПК–19) Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Способность проектировать математические модели анализа и оптимизации объектов исследования, выбирать численные методы их моделирования или разработать новый алгоритм решения задачи; выбирать оптимальные методы и программы экспериментальных исследований и	Требования ФГОС (ПК–10; ПК–21, ПК–22) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
	испытаний, проводить измерения с выбором современных технических средств и обработкой результатов измерений.	<i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки(специальность) приборостроение

Кафедра физических методов и приборов контроля качества

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) _____
(Дата) А.П. Суржиков
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме: магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4А	Жумабековой Шынар Талгаткызы

Тема работы:

Разработка фотографических методов оценки качества строительных материалов и изделий	
Утверждена приказом директора	№ 9727/с от 17.12.15

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.16
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<i>Объект исследований:</i> закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых радиографических изображений стальных канатов
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов:	– Систематизировать и классифицировать дефекты стальных канатов и методы их обнаружения и идентификации. – Исследовать возможность применения цифровой радиографии для выявления основных типов дефектов стальных канатов. – Разработать методику выбора энергии рентгеновского излучения применительно к цифровой радиографии стальных канатов. – Разработать алгоритм для оценки точности измерения эффективных диаметров стальных канатов.
Перечень графического материала	Презентация, выполненная в MS PowerPoint
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Чистякова Наталья Олеговна
«Социальная ответственность»	Анищенко Юлия Владимировна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
1 Литературный обзор и обоснование задач исследований	
1.1 Дефекты стальных канатов	
1.2 Методы контроля стальных канатов	
2 Особенности формирования и анализа цифровых радиографических изображений стальных канатов	
2.1 Структура комплексов цифровой радиографии стальных канатов	
2.2 Геометрическая схема сканирования стального каната	
2.3 Формирование цифровых радиографических изображений	
2.4 Коррекция ужесточения пучка рентгеновского излучения	
2.5 Анализ радиографических изображений стальных канатов	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
вед.научн.сотр., лаборатории №40 ИНК ТПУ	Осипов Сергей Павлович	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Жумабекова Шынар Талгаткызы		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4А	Жумабековой Шынар Талгаткызы

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	магистратура	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	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа Анализ конкурентных технических решений Выполнение SWAT- анализа проекта Оценка готовности проекта к коммерциализации
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение целей, ожидаемых результатов и требований проекта Организационная структура проекта Ограничения и допущения проекта Определение заинтересованных сторон и их ожиданий
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка экономической эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой Менеджмента	Чистякова Наталья Олеговна	кандидат экономических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Жумабекова Шынар Талгаткызы		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4А	Жумабековой Шынар Талгаткызы

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса цифровой радиографии стальных канатов и алгоритмов классификации дефектов по их образам</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности	<i>При проведении разработки методов возможности возникли вредные факторы:</i> – Отклонение параметров микроклимата; – Недостаточное освещение; – Ионизирующее (рентгеновское излучение) <i>Среди выявленных опасных факторов в данной работе являются:</i> – Электрический ток
2. Экологическая безопасность	<i>Проводимые исследования и расчеты являются экологически безопасными.</i>
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<i>Возможные ЧС: Техногенного характера</i>
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Жумабекова Шынар Талгаткызы		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 136 с., 12 рис., 30 табл., 51 источников, 1 прил.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, цифровая радиография, стальные канаты, дефекты канатов, рентгеновское излучение, оптимальная энергия, критерий оптимизации, погрешность измерения, производительность.

Объектом исследования являются: закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых радиографических изображений стальных канатов. и идентификационных изображений высокоэнергетического метода дуальных энергий.

Цель работы – разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса цифровой радиографии стальных канатов и алгоритмов классификации дефектов по их образам.

В процессе исследования проводились:

- Систематизировать и классифицировать дефекты стальных канатов и методы их обнаружения и идентификации.
- Исследовать возможность применения цифровой радиографии для выявления основных типов дефектов стальных канатов.
- Разработать методику выбора энергии рентгеновского излучения применительно к цифровой радиографии стальных канатов.
- Разработать алгоритм для оценки точности измерения эффективных диаметров стальных канатов.

В результате исследования: Результаты выполненных исследований реализованы в алгоритмах выбора и оценки параметров и характеристик комплексов цифровой радиографии стальных канатов.

Область применения: в неразрушающем контроле.

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 3241–91 Канаты стальные технические условия
2. ГОСТ 3241–91 Канат двойной свивки
3. Гост 18899–73 Канаты стальные. Канаты закрытые несущие. Технические условий
4. Гост 3071–88 Канат двойной свивки
5. ГОСТ 7372–79 Проволока стальная канатная. Технические условия.
6. ГОСТ Р 1.5 – 2012 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.
7. ГОСТ 2.104 – 2006 Единая система конструкторской документации. Основные надписи.
8. ГОСТ 2.105 – 95 Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.
9. ГОСТ 2.106 – 96 Единая система конструкторской документации. Текстовые документы.
10. ГОСТ 3.1102 – 2011 Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов.
11. ГОСТ 3.1105 – 2011 Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов общего назначения.
12. ГОСТ 7.0.5 – 2008 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка.
13. ГОСТ 7.1 – 2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание.
14. ГОСТ 7.9 – 95 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация.

15. ГОСТ 7.32 – 2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.
16. ГОСТ 8.417 – 2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.
17. СанПиН 2.2.4.548 – 96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» от 1 октября 1996г. №21.
18. СНиП 23 – 05 –95*. Нормы проектирования. Естественное и искусственное освещение. М.: Минстрой России, 2011.
19. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы [Электронный ресурс] / URL: <http://docs.cntd.ru/document/901865498>, свободный. – Загл. с экрана. — Яз. рус.

Оглавление

	Введение	15
1	Литературный обзор и обоснование задач исследований	18
1.1	Классификаций стальных канатов	18
1.2	Дефекты стальных канатов	24
1.3	Методы контроля стальных канатов	26
2	Особенности формирования и анализа цифровых радиографических изображений стальных канатов	30
2.1	Структура комплексов цифровой радиографии стальных канатов	32
2.2	Геометрическая схема сканирования стального каната	34
2.3	Формирование цифровых радиографических изображений	36
2.4	Коррекция ужесточения пучка рентгеновского излучения	40
2.5	Анализ радиографических изображений стальных канатов	43
3	Выбор оптимальных энергий рентгеновского излучения в системах цифровой радиографии стальных канатов	47
3.1	Параметры стальных канатов	47
3.2	Теоретические основы	49
3.2.1	Формирование изображений в системах сканирующей цифровой радиографии стальных канатов	50
3.2.2	Критерий оптимизации	52
3.3	Расчет оптимальных энергий	55
3.4	Оценка производительности контроля стальных канатов	58
3.5	Выбор источника рентгеновского излучения	60
3.6	Результаты экспериментов	62
3.7	Информативные параметры радиографических изображений стальных канатов	64
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	70

4.1	Потенциальные потребители результатов исследования	70
4.2	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	71
4.3	SWOT–анализ	73
4.4	Оценка готовности проекта к коммерциализации	75
4.5	Инициация проекта	76
4.5.1	Цели и результат проекта	76
4.5.2	Организационная структура проекта	77
4.6	Планирование управления научно–техническим проектом	77
4.6.1	Иерархическая структура работ проекта	77
4.6.2	Матрица ответственности	78
4.6.3	Контрольные события проекта	79
4.6.4	Реестр рисков проекта	80
4.6.5	План проекта	81
4.7	Бюджет научного исследования	84
4.7.1	Расчет затрат на сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты	84
4.7.2	Расчет затрат на электроэнергию	85
4.7.3	Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ	86
4.7.4	Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	87
4.7.5	Расчет основной заработной платы	88
4.7.6	Расчет дополнительной заработной платы	90
4.7.7	Расчет отчислений на социальные нужды	90
4.7.8	Расчет накладных расходов	90
4.7.9	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	91
4.7.10	Оценка экономической выгоды проекта	92
5	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	94

5.1	Производственная безопасность	94
5.2	Анализ вредных и опасных факторов	95
5.2.1	Отклонение параметров микроклимата	95
5.2.2	Недостатки освещения на рабочем месте	96
5.2.3	Ионизирующее излучение	97
5.2.4	Электрический ток	99
5.3	Экологическая безопасность	102
5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	103
5.4.1	Опасность возникновения пожара	103
5.5	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	104
	Заключение	107
	Список использованных источников	110
	Приложение А	117

Введение

Стальные канаты являются основным тяговым элементом разнообразных подъемных машин, механизмов и оборудования. Стальные канаты широко применяются в гражданском и транспортном строительстве, а также в индустрии отдыха. Необходимые уровни надежности и безопасности сооружений, конструкций, машин, механизмов, использующих стальные канаты, определяются, прежде всего, их качеством изготовления и текущим техническим состоянием. В процессе длительной эксплуатации стальные канаты подвергаются влиянию различных негативных факторов, среди которых следует отметить значительные нагрузки, трение и износ, коррозия, пластическая деформация и т.п. Длительное воздействие негативных факторов на стальные канаты приводит к появлению разнообразных дефектов и, как следствие, к ухудшению потребительских характеристик канатов. В качестве наиболее типичных дефектов стальных канатов можно упомянуть: обрыв проволок; износ; коррозию; уменьшение площади сечения; расплющивание; выдавливание; расплетание прядей и проволок в свивке и т.п. Для оценки технического состояния стальных канатов широко применяются различные методы неразрушающих испытаний: визуальные, визуально–измерительные фотографические, магнитные, электроискровые. У каждого из указанных методов есть свои достоинства и недостатки, но все они не в полной мере удовлетворяют потребителя. В последние годы в научной литературе наметилась тенденция увеличения количества работ, посвященных применению различных реализаций цифровой радиографии для контроля стальных канатов. Тем не менее, упомянутые работы носят в основном эпизодический характер, в них не в полной мере рассмотрены вопросы, связанные с формированием и алгоритмами обработки цифровых радиографических изображений с учетом специфики объекта контроля и уникальных дефектов. Продолжают представлять интерес вопросы не только обнаружения, но и классификации и оценки параметров дефектов по их визуальному образу на цифровых радиографических изображениях. Помимо

указанных задач, безусловно, являются **актуальными** задачи выбора и оценки параметров и характеристик комплексов цифровой радиографии стальных канатов. Указанный вывод вытекает из анализа научных публикаций последнего десятилетия.

Предмет диссертационных исследований – методы цифровой радиографии стальных канатов.

Объект исследований – закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых радиографических изображений стальных канатов. х идентификационных изображений высокоэнергетического метода дуальных энергий.

Цель исследований – разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса цифровой радиографии стальных канатов и алгоритмов классификации дефектов по их образам.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

- Систематизировать и классифицировать дефекты стальных канатов и методы их обнаружения и идентификации.
- Исследовать возможность применения цифровой радиографии для выявления основных типов дефектов стальных канатов.
- Разработать методику выбора энергии рентгеновского излучения применительно к цифровой радиографии стальных канатов.
- Разработать алгоритм для оценки точности измерения эффективных диаметров стальных канатов.

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

Научная новизна:

- Систематизированы и классифицированы дефекты стальных канатов и методы их обнаружения и идентификации.

- Доказана возможность применения цифровой радиографии для выявления основных типов дефектов стальных канатов.
- Разработана методика выбора энергии рентгеновского излучения применительно к цифровой радиографии стальных канатов.
- Разработан алгоритм для оценки точности измерения эффективных диаметров стальных канатов.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в результате диссертационных исследований алгоритмы обработки радиографических изображений стальных канатов и рекомендации позволяют повысить вероятность обнаружения и правильной идентификации дефектов, а также выбрать максимальную энергию рентгеновского излучения по критерию минимальной погрешности оценки эффективного диаметра стального каната.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований реализованы в алгоритмах выбора и оценки параметров и характеристик комплексов цифровой радиографии стальных канатов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались на отчетах по НИР кафедры ФМПК в 2014 – 2016 годах.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 2 печатных работах, одна из них опубликована в журнале, реферируемом в SCOPUS и WEBofScience, а вторая в журнале из Перечня ВАК.

На защиту выносятся:

Систематизация и классификация дефектов стальных канатов и методов их обнаружения и идентификации.

- Доказательство возможности применения цифровой радиографии для выявления основных типов дефектов стальных канатов.
- Методика выбора энергии рентгеновского излучения применительно к цифровой радиографии стальных канатов.
- Алгоритм для оценки точности измерения эффективных диаметров стальных канатов.

1 Литературный обзор и обоснование задач исследований

1.1 Классификаций стальных канатов

Стальной канат относится к одному из видов грузоподъемных приспособлений и является сложным и ответственным видом проволочных витых изделий. В соответствии с ГОСТ 3241–91 (государственный стандарт на стальные канаты общего назначения), канаты подразделяются по следующим признакам:

По основному конструктивному признаку различают канаты: одинарной, двойной и тройной свивки.

Канаты одинарной свивки или спиральные на рисунке 1.1 *а* состоят из проволок, свитых по спирали в один или несколько concentрических слоев. Канаты одинарной свивки, свитые только из круглой проволоки, называют обыкновенными спиральными канатами.

Канаты двойной свивки на рисунке 1.1 *б* состоят из прядей, свитых в один или несколько concentрических слоев. Канаты двойной свивки могут быть однослойные или многослойные. Многослойная свивка отличается повышенной гибкостью и большой опорной поверхностью, а кроме того, может придавать канату некрутящиеся свойства.

Канаты тройной свивки на рисунке 1.1 *в* состоят из стренг, свитых по спирали в один concentрический слой.

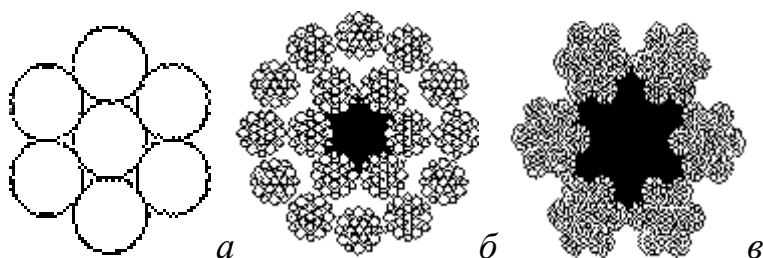


Рисунок 1.1 – Конструкции канатов:

а – канат одинарной свивки; *б* – канат двойной свивки; *в* – канат тройной свивки

По форме поперечного сечения канаты подразделяют на круглые и плоские.

По форме поперечного сечения прядей различают канаты кругло – и фасоннопрядные (трехграннопрядные, плоскопрядные). Фасонный канат имеет значительно большую поверхность прилегания к шкиву, чем круглопрядный. Стальная проволока круглого сечения должна соответствовать требованиям ГОСТ 7372–79. Стальная проволока фасонного профиля должна соответствовать нормативно–технической документации.

По типу свивки прядей и канатов одинарной свивки различают канаты:

тип ТК – с точечным касанием проволок между слоями;

тип ЛК – с линейным касанием проволок между слоями;

тип ЛК–О – с линейным касанием проволок между слоями при одинаковом диаметре проволок по слоям пряди;

тип ЛК–Р – с линейным касанием проволок между слоями при разных диаметрах проволок в наружном слое пряди;

тип ЛК–З – с линейным касанием проволок между слоями пряди и проволоками заполнения;

тип ЛК–РО – с линейным касанием проволок между слоями и имеющих в пряди слои с проволоками разных диаметров и слои с проволоками одинакового диаметра;

тип ТЛК – с комбинированным точечно–линейным касанием проволок в прядях.

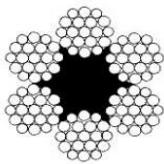
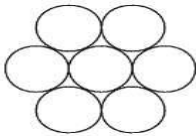
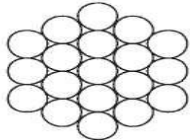
Пряди с точечным касанием проволок изготавливают за несколько технологических операций в зависимости от числа слоев проволок. При этом необходимо применять разные шаги свивки проволок для каждого слоя пряди и повивать следующий слой в противоположном направлении предыдущему. В результате проволоки между слоями перекрещиваются. Такое расположение проволок увеличивает их износ при сдвигах в процессе эксплуатации, создает значительные контактные напряжения, способствующие развитию в

проволоках усталостных трещин, и уменьшает коэффициент заполнения сечения каната металлом.

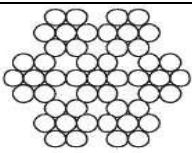
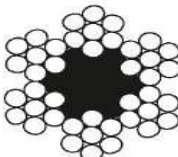
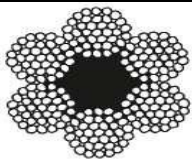
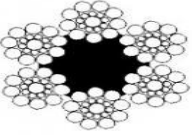
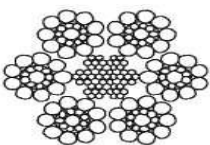
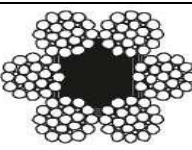
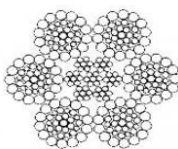
Пряди с линейным касанием проволок изготавливают за один технологический прием; при этом сохраняется постоянство шага свивки и одинаковое направление свивки проволок для всех слоев пряди, что при правильном подборе диаметров проволок по слоям, дает получение линейного касания проволок между слоями. В результате значительно снижается износ проволок и резко возрастает работоспособность канатов с линейным касанием проволок в прядях в сравнении с работоспособностью канатов типа ТК.

Пряди точно – линейного касания применяют при необходимости замены в прядях линейного касания центральной проволоки семипроволочной прядью, когда на однослойную семипроволочную прядь типа ЛК укладывается слой проволок одинакового диаметра с точечным касанием. Пряди точно–линейного касания, при соответствующем выборе параметров свивки, могут обладать повышенными некрутящимися свойствами [1]. На таблице 1.1 приведена структура и область применения стальных канатов.

Таблица 1.1 – Области применения канатов

ГОСТ	Структура каната	Диаметр каната, мм	Тип свивки	Области применения
1	2	3	4	5
2688–80		3.6 – 56.0	Двойная свивка типа ЛК–Р	Комплектуются для подъемных устройств для гидравлических лифтов.
3062–80		0.65 – 11.50	Одинарная свивка типа ЛК–О	используются в качестве грозозащитного троса.
3063–80		1.0 – 19.0	Одинарная свивка типа ТК	используются как грозозащитные тросы.

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
3066-80		1.9 – 27.5	Двойная свивка типа ЛК-О	Используются на лифтах, на шахтных подъемных установках
3069-80		3.0 – 20.0	Двойная свивка типа ЛК-О	Применяются лифтах, на шахтных подъемных установках
3071-88		5.0 – 15.5	Двойная свивка типа ТК-О	Применяются как канаты общего назначения, кроме грузоподъемных кранов.
3077-80		4.6 – 46.0	Двойная свивка типа ЛК-О	Применяются в качестве подъемных канатов на судах и лифтах.
3081-80		6.4 – 45.5	Двойная свивка типа ЛК-О	Области применения – судовые установки, землеройные дорожные машины в качестве подъемных.
7665-80		9.7 – 48.5	Двойная свивка типа ЛК-З	Применяются для лифтов, лесопогрузочных машин.
7669-80		5.9 – 72.0	Двойная свивка типа ЛК-РО	Используются для металлургических кранов, строительных сооружений.

По материалу сердечника различают канаты с органическим или металлическим сердечником.

В канатах с органическим сердечником – (ОС) в качестве сердечника в центре каната, а иногда и в центре прядей, используются сердечники из натуральных, синтетических и искусственных материалов.

В канатах с металлическим сердечником – (МС) в качестве сердечника, в большинстве конструкций, применяется канат двойной свивки из шести семипроволочных прядей, расположенных вокруг центральной семипроволочной пряди. Канаты с металлическим сердечником целесообразно применять тогда, когда надо повысить структурную прочность каната, уменьшить конструктивные удлинения каната при растяжении, а также при высокой температуре среды, в которой работает канат [2].

По способу свивки канаты различают нераскручивающиеся и раскручивающиеся.

В нераскручивающихся канатах – (Н) пряди и проволоки сохраняют заданное положение после снятия перевязок с конца каната или легко укладываются в ручную при незначительном раскручивании, что достигается предварительной деформацией проволок и прядей и последующей рихтовкой каната при свивке проволок в прядь и прядей в канат.

В раскручивающихся канатах – (не обозначается) – проволоки и пряди не освобождены от внутренних напряжений, возникающих в процессе свивки проволок в пряди и прядей в канат. Поэтому пряди и проволоки в прядях не сохраняют своего положения в канате после снятия перевязок с конца каната [3].

По степени уравниваемости канаты различают рихтованные и нерихтованные.

Рихтованный канат – (Р) – не теряет своей прямолинейности (в пределах допустимого отклонения) в свободном подвешенном состоянии или на горизонтальной плоскости, т.к. напряжения от деформации проволок и прядей сняты рихтовкой.

Нерихтованный канат – (не обозначается) – не обладает таким свойством, свободный конец нерихтованного каната стремится образовать кольцо, за счет напряжений деформации проволок и прядей полученных в процессе изготовления каната [4].

По механическим свойствам проволоки различают канаты:

- марки ВК – высокого качества;
- марки В – повышенного качества;
- марки 1 – нормального качества.

По виду покрытия поверхности проволок различают канаты:

Из проволок без покрытия – не обозначается.

Из оцинкованной проволоки в зависимости от поверхностной плотности цинка:

- группы С – для средних агрессивных условий работы;
- группы Ж – для жестких агрессивных условий работы;
- группы ОЖ – особо жестких агрессивных условий работы;
- П – канат или пряди покрыты полимерными материалами.

По назначению различают канаты:

– грузоподъемные – (ГП) – (марок ВК, В) для подъема и транспортировки людей и грузов;

- грузовые – (Г) – для подъема и транспортировки грузов.

По точности изготовления различают канаты:

- нормальной точности – не обозначается;
- повышенной точности – (Т) – с ужесточенными предельными отклонениями по диаметру каната.

По прочностным характеристикам различают канаты (в основу классификации положено значение временного сопротивления разрыву) [5]:

- $1370 \text{ Н} / \text{мм}^2$ ($140 \text{ кгс} / \text{мм}^2$)
- $1470 \text{ Н} / \text{мм}^2$ ($150 \text{ кгс} / \text{мм}^2$);
- и далее через 100 до $2160 \text{ Н} / \text{мм}^2$

1.2 Дефекты стальных канатов

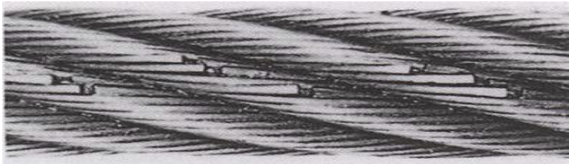
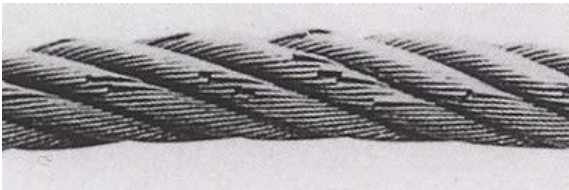
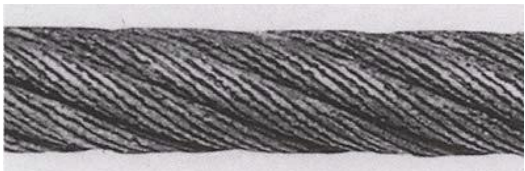
Канаты грузоподъемных машин, транспортирующих расплавленный металл, необходимо защищать от непосредственного воздействия теплоты и брызг металла, устанавливая отражающие кожухи. Преждевременный износ канатов и их повреждения могут происходить в результате неправильного выбора конструкции каната, типа и направления свивки неправильной навивки на барабан, неправильного выбора соотношения диаметров каната и барабана или блока, профиля и размера ручья блока и канавок барабана, перегрузок, чрезмерных динамических воздействий на канат, абразивного износа и коррозии.

Чтобы уменьшить износ каната и предохранить его от повреждений, при хранении и эксплуатации канаты покрывают защитной смазкой. Обычно в качестве смазочного материала применяют канатные смазки 39 у и торсиол 35, а для канатов особо ответственных механизмов — торсиол 55. Эти виды смазок обладают хорошей адгезией, не снимаются при эксплуатации, проникают к центру каната и прядей, обладают способностью покрывать поверхность каната тонкой пленкой и быстро застывать, не испаряются и не затвердевают со временем, не содержат щелочей, кислот и других элементов, вызывающих коррозию.

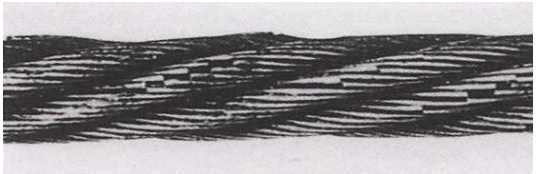
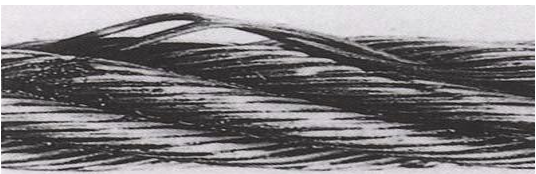
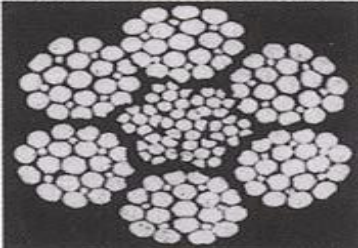
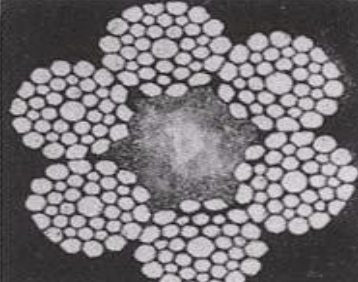
Как было сказано выше на работоспособность каната, при его правильном подборе и применении, т.е. правильно выбрана конструкция каната, его размер, разрывное усилие проволок, а также диаметре барабана и шкивов, радиусе желобов шкивов и других конструктивных характеристиках подъемного оборудования, оказывают влияние два определяющих фактора: коррозия и механический износ. В зависимости от условий эксплуатации тот или иной фактор является определяющим для изъятия каната из эксплуатации.

Основные виды износа и коррозионного разрушения канатов сведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Дефекты стального каната

Дефекты стального каната	Внешнее проявление
1	2
Локализованный износ вследствие абразивного истирания на опорной конструкции.	
Узкая полоса износа, приводящая к усталостным разрушениям, вызванным работой в слишком больших желобах или по слишком малым опорным роликам.	
Две параллельные полосы оборванных проволок, свидетельствующие об изгибе при движении по слишком узкому желобу шкива.	
Сильный износ каната односторонней свивки, вызванный абразивным истиранием	
Сильный износ, связанный с высоким опорным давлением.	
Сильная коррозия.	

Продолжение таблицы 1.2

1	2
Типичные порывы проволок в результате усталости при изгибе.	
Порывы проволок в точках сопряжения прядей или прядей с сердечником	
Внутренняя коррозия, в то время как наружная поверхность имеет мало признаков разрушения.	
Значительный износ и сильная внутренняя коррозия.	

1.3 Методы контроля стальных канатов

В настоящее время для выявления производственных и эксплуатационных дефектов стальных канатов применяют оптико–визуальные, магнитные, ультразвуковые и другие методы неразрушающих испытаний. С помощью оптико–визуальных методов выявляются поверхностные дефекты стальных канатов (обрывы проволок, коррозионные поражения). Магнитные и ультразвуковые методы также позволят выявить указанные дефекты в приповерхностном слое канатов [6].

Визуальный осмотр каната осуществляется способом "рукавицы". Данный метод широко применяется на всех типах подъемных установок.

Однако объективность оценки состояния каната (количества оборванных проволок) очень низка и не отвечает требованиям по надзору за эксплуатацией канатов в процессе работы подъемной установки. Поскольку данным методом определяются лишь порывы проволок каната, образовавшиеся и выделенные на его поверхности, оценить состояние внутренних проволок им невозможно [7].

Для неразрушающего контроля стальных канатов применяют электромагнитные (магнитные), ультразвуковые дефектоскопы. Дефектоскоп стальных канатов ДСК–УБ используется для обнаружения оборванных проволок и подсчета их числа по всей длине и на шаге свивки [8]. Принцип его работы основан на использовании магнитных полей рассеяния, образующихся у оборванных проволок при продольном намагничивании каната. Общий магнитный поток измеряют датчиком Холла, либо другими датчиками, пригодными для измерения абсолютного значения магнитного потока или изменений этого потока. Однако дефектоскопы этого типа не получили широкого распространения из-за трудностей установления фактических порывов проволок при коррозии внутри каната.

Методы контроля технического состояния подъемного каната основаны на определении разности параметров преобразователя приборов ИИСК – 4 и ИИСК – 5, установленного на контрольном отрезке каната и затем на контролируемом канате. В МакНИИ (Россия) под руководством заведующим лабораторией кандидата технических наук В.И. Бережинского ведутся теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию инструментального метода контроля за состоянием подъемных канатов. Применение разработанных приборов серии ИИСК обеспечивает достаточную точность измерения утонения сечения каната, позволяет определить разрушения цинкового покрытия или разрушение стали. В то же время на показания приборов оказывают влияние ферромагнитные массы (расстрелы, тормозные канаты и др.), расположенные на расстоянии менее 0,5 м от

контролируемого каната [9,10]. Существенным недостатком этих приборов является повышенная скорость износа бронзовых башмаков измерительного преобразователя, а наличие соединительных муфт с мелкими гайками затрудняет установку преобразователя и подготовку его к работе. Приборы серии ИИСК имеют малую максимальную скорость контроля каната (до 0,5 м/с), сложность настройки и калибровки, значительную массу преобразователя и габариты. Поэтому необходимо изыскивать принципиально новые решения в создании устройств контроля износа стальных канатов [11].

В приборе магнитной дефектоскопии стальных канатов ИНТРОС [12] высокая способность обнаруживать порывы проволок достигается за счет использования микрокомпьютерной техники. Расшифровку дефектограммы должен проводить квалифицированный и опытный специалист, однако это не исключает ошибок из-за субъективности оценок. Скорость движения каната составляет 1 – 2 м/с. Точность обнаружения разрывов находится в пределах 6 диаметров каната. Места дефектов в виде вспучивания проволок каната этот прибор не обнаруживает [13]

Для испытаний канатов большого диаметра возможно применение классической рентгенографии, недостатком которой является использование рентгеновских пленок, что не позволяет оперативно выдавать заключения о техническом состоянии стальных канатов [14]. Стоимость проведения подобных работ является достаточно высокой, так как используются дорогостоящие расходные материалы. Но при этом рентгеновская дефектоскопия является наиболее универсальным методом поиска дефектов, она позволяет обнаружить практически все типы дефектов стальных канатах различной конструкции, различного диаметра. Одной из реализаций рентгеновской дефектоскопии является цифровая сканирующая радиография [15].

Цифровая радиография является более прогрессивной и удобной во многих отношениях альтернативной традиционной радиографии в промышленном неразрушающем контроле. Сама по себе технология

радиографии предполагает некоторые неудобства и ограничения, вызванные использованием рентгеновских пленок [16].

Применение пленки подразумевает их однократное использование, часто – низкую производительность, значительные неудобства при проявке снимков, малый динамический диапазон пленки, трудности в организации хранения пленки и готовых снимков, вытекающие из всего этого затраты на энергообеспечение. Помимо этого, традиционная промышленная радиография означает постоянный расход химических реагентов, часто дорогостоящих и небезопасных с экологической точки зрения.

Преимущество цифровой радиографии в том что, позволяет полностью обойтись без применения традиционной рентгеновской пленки, что делает данную технологию одной из наиболее прогрессивных в области неразрушающего контроля.

2 Особенности формирования и анализа цифровых радиографических изображений стальных канатов

Стальные канаты широко применяются в коммунальном хозяйстве, строительстве, промышленности. От качества произведённых стальных канатов и их технического состояния в процессе эксплуатации зависит безопасность и надёжность подъемно–транспортных машин (ПТМ) и оборудования различного назначения. В настоящее время ужесточаются требования к уровням безопасности и надёжности ПТМ и, особенно, лифтов и подъёмников. Обеспечение указанных требований невозможно без применения методов неразрушающих испытаний в процессе изготовления стальных канатов и в процессе эксплуатации. Стальные канаты являются представителями класса витых изделий, элементы которых испытывают значительные нагрузки в процессе изготовления канатов, что может привести к появлению разнообразных дефектов. В процессе эксплуатации именно стальные канаты наиболее подвержены деградации, так как они являются тяговыми элементами ПТМ, и их функционирование происходит в неблагоприятных условиях. Негативные воздействия (высокие уровни механических напряжений, коррозия, износ и т.д.) приводят к появлению дефектов в стальных канатах и существенному ухудшению технического состояния канатов, приводящему к повышению вероятности наступления отказа и аварии. Отказы и аварии могут привести к непредусмотренным материальным затратам и даже человеческим жертвам. В последние десятилетия наблюдается бурное развитие неразрушающих методов испытаний и средств, их реализующих, для контроля промышленных изделий, в том числе и стальных канатов. К основным методам неразрушающих испытаний, которые предназначены для обнаружения производственных и эксплуатационных дефектов стальных канатов, относятся различные реализации оптических, магнитных, ультразвуковых, электрических и других методов [17 – 19]. Некоторые виды поверхностных дефектов, к которым относятся, например, обрывы проволок, коррозия, истирание,

достаточно эффективно выявляются с помощью оптико–визуальных методов. Некоторые из дефектов, указанных выше, но расположенных внутри каната, могут быть выявлены с помощью магнитных и ультразвуковых методов неразрушающих испытаний. Наиболее сложными объектами неразрушающих испытаний являются канаты большого диаметра. Для указанных объектов может быть применена классическая радиография, которой присущ ряд недостатков: использование радиографических пленок, содержащих серебро, что приводит к высокой стоимости испытаний, а также чрезвычайно низкая производительность из–за множества стадий формирования теневых изображений и их длительности. Упомянутые недостатки сужают область применения классической радиографии до решения задач, связанных с экспертизой аварий, имеющих значительный ущерб или человеческие жертвы. С 80–х годов прошлого века ускоренными темпами развиваются различные реализации цифровой радиографии [20 – 27], отличающиеся высокой производительностью, высокой чувствительностью и возможностью применять различные алгоритмы обработки изображений. Появление высокочувствительных линеек (панелей) радиометрических детекторов, позволяющих формировать радиографические изображения, геометрическое разрешение которых приближается к классической радиографии, и расширение номенклатуры высокоэффективных источников рентгеновского излучения обуславливают применимость цифровой радиографии для неразрушающих испытаний стальных канатов большого диаметра [28 – 30]. Данные, имеющиеся в научной литературе, не позволяют адекватно описать процесс формирования и обработки цифровых радиографических изображений с учётом особенностей стальных канатов большого диаметра.

Обсудим вопросы формирования и обработки цифровых радиографических изображений стальных канатов.

2.1 Структура комплексов цифровой радиографии стальных канатов

Цифровое радиографическое изображение стального каната формируется в результате сканирования его узким пучком рентгеновского излучения. Возможны два варианта сканирования. В первом варианте канат перемещается относительно неподвижной системы – рентгеновский аппарат – детектор. Во втором варианте эта система перемещается относительно неподвижного стального каната. Первый вариант предпочтителен в случае испытаний канатов в процессе их производства и эксплуатации при обеспечении возможности наматывания каната. Второй вариант является безальтернативным при статичном расположении стальных канатов, что характерно, например, для некоторых конструкций мостов.

Сканирование стальных канатов может быть осуществлено двумя способами – дискретным и непрерывным. В первом случае взаимное перемещение объекта испытаний и системы источник излучения – детектор осуществляется фиксированными шагами – Δl . Во втором случае строка радиографического изображения формируется за интервал времени – Δt . Способы сканирования являются эквивалентными с точки зрения качества конечных изображений. Параметры непрерывного и дискретного сканирования связаны соотношением – $\Delta l = V \Delta t$, где V – скорость перемещения каната относительно источника рентгеновского излучения. Предпочтение в практической реализации отдаётся непрерывному сканированию, которое является более производительным по сравнению с дискретным сканированием: исключаются интервалы времени на перемещение каната.

Разнообразие комплексов цифровой радиографии дополняется вариативностью типа источников рентгеновского излучения, в качестве которых могут быть использованы рентгеновские аппараты импульсного и непрерывного действия. Импульсные источники рентгеновского излучения, как правило, являются более мощными. Применение импульсных источников

рентгеновского излучения может быть в ряде случаев ограничено, так как время формирования одной строки изображения t не может быть меньше $1/\nu$, где ν – частота импульсов рентгеновского излучения. Кроме этого рентгеновские аппараты могут быть с фиксированной и регулируемой максимальной энергией.

В случае использования импульсных рентгеновских источников для формирования радиографических изображений стальных канатов единственным возможным режимом регистрации излучения является интегральный режим. Если применяется рентгеновский аппарат непрерывного действия, то для источников излучения малой интенсивности помимо интегрального режима регистрации излучения возможны и различные реализации счётного метода. Выделяют следующие реализации счётного метода регистрации: собственно счётный метод; временная реализация счётного метода; спектральная реализация счётного метода.

В комплексе цифровой радиографии стальных канатов предусмотрен блок биологической защиты для защиты оператора и другого персонала от воздействия рентгеновского излучения. Весогабаритные характеристики биологической защиты определяются мощностью рентгеновского аппарата, максимальной энергией рентгеновского излучения, удалённостью рабочих мест персонала от зоны испытаний.

Известно, что излучение, рассеянное в объекте испытаний и в окружающих предметах и зарегистрированное радиометрическими детекторами, существенно снижает качество неразрушающего контроля. Традиционно негативное влияние рассеивания уменьшают, применяя коллиматоры источника рентгеновского излучения и линейки радиометрических детекторов. Коллиматоры могут быть выполнены в виде щелей либо, пинголов [31]. Для уменьшения массы комплекса коллиматор источника и биологическую защиту рационально проектировать совместно.

Другим физическим фактором, затрудняющим анализ радиографических изображений, является ужесточение рентгеновского излучения с увеличением

толщины объекта испытаний. Существуют два основных подхода к компенсации указанного фактора. Первый из них основан на неизменности материала испытываемого объекта, компенсация осуществляется по результатам предварительных калибровочных измерений. Второй подход связан с применением спектральной реализации счётного режима регистрации рентгеновского излучения.

Ниже приведём описание геометрической схемы сканирования стальных канатов.

2.2 Геометрическая схема сканирования стального каната

На рисунке 2.1 приведена геометрическая схема, аналогичная [30], непрерывного сканирования стального каната узким (щелевым) пучком рентгеновского излучения.

Конструкции стальных канатов отличаются большим разнообразием, но общие принципы формирования цифровых радиографических изображений неизменны. Общей особенностью подобных объектов испытаний можно считать то, что лучевая толщина объекта изменяется от нуля на периферии до некоторого максимального значения. Указанный факт является определяющим для выбора параметров комплекса цифровой радиографии. Поэтому анализируемый объект контроля представим в виде стального цилиндра радиуса R . Упомянутая цилиндрическая поверхность является описанной для каната. Для удобства рассуждений можно считать, что все радиометрические детекторы линейки ориентированы на источник рентгеновского излучения. Радиографический комплекс для испытания стальных канатов состоит из следующих элементов: источника рентгеновского излучения – 1, биологической защиты – 2 со встроенным коллиматором источника – 3, объекта контроля – 4, коллиматора – 5 линейки детекторов – 6.

Единичные радиометрические детекторы из линейки детекторов имеют поперечные размеры $a \times a$ и расположены от источника излучения на одинаковом расстоянии – F . Дополнительными характеристиками

геометрической схемы радиационных испытаний стального каната является минимальное расстояние A от источника рентгеновского излучения до объекта контроля и длина дуги – l , дуга касается фронтальных поверхностей радиометрических детекторов.

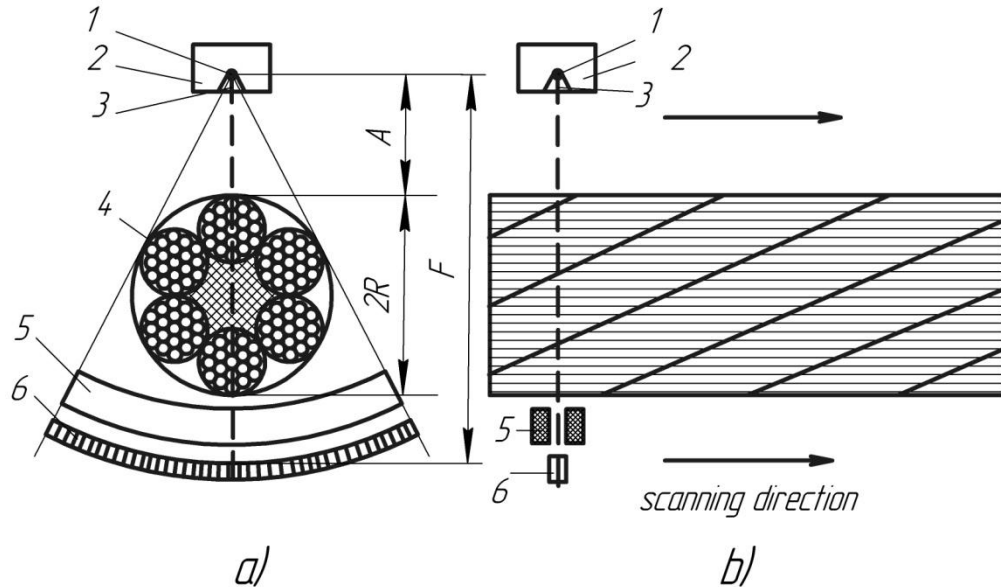


Рисунок 2.1 – Геометрическая схема сканирования стального каната:
a – сечение комплекса цифровой радиографии в направлении, перпендикулярном направлению сканирования;
b – сечение комплекса цифровой радиографии в направлении сканирования

Исходное цифровое радиационное изображение I является матрицей с размерностью $N \times M$. Для определённости будем считать $M \ll N$. Значение M равно количеству радиометрических детекторов в линейке, а значение $N = l / \Delta l = l / (V \Delta t)$. Приближённая формула для нахождения геометрического параметра l для случая плотного прилегания радиометрических детекторов друг к другу имеет вид

$$l \approx Ma. \quad (2.1)$$

Количество радиометрических детекторов в линейке (строки в панели) M выбирается из геометрических соображений с учётом необходимости использования крайних детекторов для комплексов на основе импульсных источников рентгеновского излучения в качестве опорных каналов для калибровки. Ограничение для M запишется следующим образом

$$M > \text{int}\left(\frac{2F}{a} \arcsin \frac{R}{R+A} + 0,5\right) + 2k + 2, \quad (2.2)$$

где R – радиус каната;

k – количество граничных детекторов в линейке, исключаящее гипотетическое перекрытие тенью ОК линейки радиометрических детекторов.

Упомянутое перекрытие может быть вызвано флуктуациями положения стального каната относительно системы источник излучения – линейка детекторов.

Остановимся подробно на этапах процесса формирования и анализа радиографической информации применительно к испытаниям стальных канатов.

2.3 Формирование цифровых радиографических изображений

Будем считать, что детектор с номером m , $m=1...M$ характеризуется двумя параметрами – k_m , σ_m , где k_m – коэффициент усиления, а σ_m – уровень собственных шумов. Пусть объект контроля (стальной канат) сканируется щелевым пучком рентгеновского излучения с максимальной энергией $E_{\max}$. Источник рентгеновского излучения не является изотропным. Из сказанного выше следует необходимость уменьшения влияния индивидуальных особенностей детекторов на качество конечных изображений. Упомянутое уменьшение достигается двумя видами калибровок – калибровкой по «чёрному» и калибровкой по «белому». Калибровка по «чёрному» сводится к определению средних уровней собственных темновых шумов детекторов и последующим их вычитанием из информативных сигналов. При калибровке по «белому» информативный сигнал, полученный за объектом и откалиброванный по «чёрному», нормируется на откалиброванный сигнал без ОК.

Сказанное выше означает, что для формирования цифровых радиографических изображений должны быть проведены три вида измерений. Для калибровки по «чёрному» проводятся измерения с выключённым источником рентгеновского излучения – I_b . Для калибровки по «белому»

проводятся измерения с включённым источником рентгеновского излучения без ОК – I_w . Основное изображение I формируются с объектом контроля. Количество строк N_b и N_w в изображениях I_b , I_w существенно меньше N .

Совокупности аналоговых сигналов (изображений) I_b , I_w , I превращаются с помощью АЦП в совокупности цифровых сигналов (изображений) J_b , J_w , J . Этот процесс описывается выражениями

$$\begin{aligned} J_{nm} &= \left[\frac{I_{nm}}{\Delta I} \right], n=1 \div N, m=1 \div M; J_{bnm} = \left[\frac{I_{bnm}}{\Delta I} \right], n=1 \div N_b; \\ J_{wnm} &= \left[\frac{I_{wnm}}{\Delta I} \right], n=1 \div N_w, \end{aligned} \quad (2.3)$$

здесь $[x]$ – целая часть числа x ,

ΔI – шаг квантования.

Шаг квантования ΔI связан с разрядностью АЦП k соотношением $\Delta I = I_{lim}/2^k$, здесь I_{lim} – максимальный возможный уровень сигналов с радиометрических детекторов. В случае использования источников импульсного рентгеновского излучения изображения J_w , J дополнительно нормируются на сигнал с опорного канала.

На следующем этапе из изображений J_b , J_w , J формируется цифровое радиографическое изображение Y

$$Y_{nm} = -\ln \frac{J_{nm} - \sigma_m}{J_{0m} - \sigma_m}, \sigma_m = \frac{\sum_{n=1}^{N_b} J_{bnm}}{N_b}, J_{0m} = \frac{\sum_{n=1}^{N_w} J_{wnm}}{N_w}. \quad (2.4)$$

Конечное цифровое радиографическое изображение стального каната Y может быть проанализировано оператором либо специализированным алгоритмом, ориентированным на выявление, идентификацию и оценку степени критичности дефектов. В первом случае изображение Y трансформируется в цифровое полутоновое изображение Y_{GS}

$$Y_{GS\ nm} = M_{hl} \frac{Y_{nm} - S_b}{S_w - S_b}, \quad (2.5)$$

здесь S_b , S_w – уровни «черного» и «белого» в изображении Y ;

M_{hl} – число полутонов – градаций «серого».

Наиболее целесообразным представляется подход, при котором $S_b = \min_{n,m} Y_{nm}$, $S_b = \max_{n,m} Y_{nm}$, здесь $m=1 \dots M$; $n=1 \dots N$. Изменение этого подхода может привести к снижению информативности изображения. Применение других уровней «чёрного» и «белого» вызывается, например, адаптацией системы применительно к конкретному оператору.

Полутоновое изображение Y_{GS} анализируется для выявления дефектов и заключения об их допустимости.

В настоящее время используется значительное количество типов канатов, отличающихся друг от друга не только диаметром, но и конструкцией. На рисунке 2.2 для иллюстрации сложности внутренней структуры стального каната диаметром 25 мм приведено изображение его сечения, полученное методом рентгеновской вычислительной томографии (РВТ).

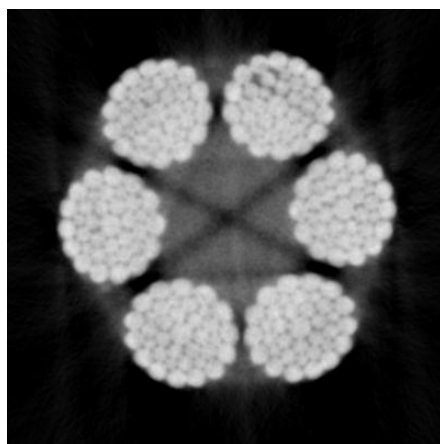


Рисунок 2.2 – Визуализация внутренней структуры стального каната с помощью РВТ

Анализ радиографических изображений стальных канатов оператором затруднён неоднородностью распределения яркости по изображению каната. Указанная неоднородность приводит к различию вероятностей обнаружения дефектов в центральной и периферической областях. Упомянутые сложности устраняются с помощью применения специализированных алгоритмов обработки радиографических изображений, например [28].

Был получен ряд радиографических изображений для различных максимальных энергий рентгеновского излучения. В качестве объекта контроля

использовали канат, внутренняя структура которого представлена на рисунках 2.2 и 2.3 приведено типичное радиографическое изображение стального каната.

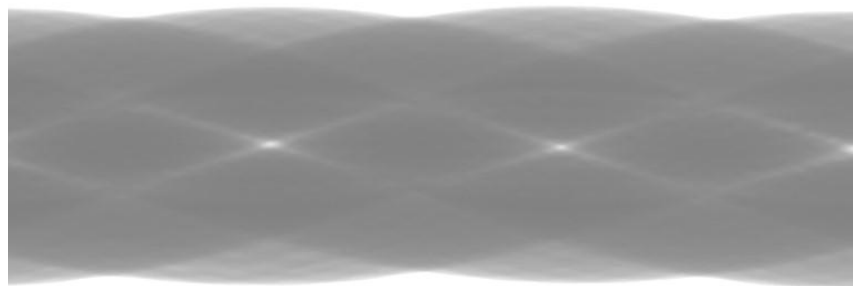


Рисунок 2.3 – Типичное цифровое радиографическое изображение стального каната

Эксперимент проводился на установке для промышленной томографии и радиографии, разработанной в Томском политехническом университете. В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка MXR–451HP/11 (производства Comet AG, Швейцария). Трубка непрерывного действия с минимальным размером фокусного пятна 0,4 мм, напряжением до 450 кВ, мощностью до 500 Вт. В качестве детектора использовалась панель XRD 1622 (производства PerkinElmer, США). Панель изготовлена по TFT–технологии, имеет размер пикселя 200 мкм, сцинтиллятор из иодида цезия (CsI), и предназначена для детектирования излучения высоких энергий, используемых в промышленности. Наилучшие результаты томографического и радиографического контроля (рисунок 2.2, 2.3) были получены при энергии излучения 200 кэВ с использованием медного фильтра толщиной 2 мм с проекционным увеличением 2,2 раз. Очевидно, что такого пространственного разрешения недостаточно для качественного анализа радиографических изображений стальных канатов человеком–оператором. Как выше уже подчеркнуто, ситуация может быть существенно улучшена при использовании специализированных алгоритмов обработки радиографических изображений [28, 30].

Выше указано, что ряд физических и технических факторов существенно ухудшают основные показатели качества изображения – контраст

и разрешение. К таким факторам относятся, прежде всего, ужесточение пучка рентгеновского излучения с возрастанием толщины ослабляющего барьера, рассеяние фотонов в объекте контроля, квантование первичных радиометрических сигналов и т.п. Негативное влияние одних факторов устраняется введением в систему формирования радиографических изображений дополнительных технических элементов. Например, для уменьшения влияния рассеяния применяют коллиматоры источника излучения или (и) линейки радиометрических детекторов. Влияние других факторов уменьшают надлежащим выбором параметров. Например, негативное влияние квантования уменьшается соответствующим выбором разрядности АЦП. Влияние третьих факторов снижают алгоритмическим путём на основе специальным образом организованных тестовых испытаний. К таким факторам относится, например, ужесточение пучка рентгеновского излучения.

2.4 Коррекция ужесточения пучка рентгеновского излучения

Традиционно уравнение, связывающее радиометрический сигнал I с толщиной ослабляющего объекта ρH в г/см^2 , записывается следующим образом [31]

$$I/I_0 = e^{-m_{ef}(E_{max}, \rho H)\rho H}, \quad (2.6)$$

где $m_{ef}(E_{max}, \rho H)$ – эффективный массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения с максимальной энергией E_{max} ;

I_0 – радиометрический сигнал без объекта контроля.

Очевидно, что алгоритм коррекции ужесточения пучка рентгеновского излучения сводится к оценке параметра ρH . Существует несколько основных подходов к реализации алгоритма коррекции: графический, метод обратных функций, аналитических приближений и метод дуальных энергий (МДЭ). Графический метод и метод обратных функций сводятся к решению уравнения

$$m_{ef}(E_{max}, \rho H)\rho H = -\ln(I/I_0) = Y = F(\rho H). \quad (2.7)$$

В графическом методе по результатам экспериментальных исследований или математического моделирования строится график функции $F(\rho H)$ для фиксированной геометрии контроля и заданного значения E_{max} . Ось ρH является осью абсцисс, а F – ординат. Абсцисса точки пересечения прямой $Y=Y_1$, здесь Y_1 – измеренный сигнал, и кривой $F(\rho H)$ и есть искомое значение толщины ρH , соответствующее сигналу Y_1 . Разумеется, графический метод не отличается высокой точностью и высокой производительностью.

Функция $F(\rho H)$ является непрерывной, гладкой и возрастающей, поэтому альтернативой графическому методу являются метод обратных функций, в котором оценка толщины ρH осуществляется по формуле

$$\rho H = F^{-1}(Y), \quad (2.8)$$

где F^{-1} – функция, обратная к F . Продемонстрируем один из возможных подходов к использованию метода обратных функций применительно к исследуемой задаче при проведении калибровочных измерений. Пусть параметр ρH принимает значения $\rho H_1, \rho H_2, \dots, \rho H_n$. Им соответствует набор значений измерительных сигналов $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$. Если измерительный сигнал принимает значение Y , в качестве грубой оценки искомого параметра ρH можно взять значение ρH_i , для которого отклонение $|Y_k - Y|$, $k=1..n$ минимально. Более точная оценка ρH находится с помощью линейной интерполяции

$$\rho H \approx \rho H_i + \frac{(Y - Y_i)(\rho H_{i+1} - \rho H_i)}{Y_{i+1} - Y_i}. \quad (2.9)$$

Если значение n велико и калибровочные толщины $\rho H_1, \rho H_2, \rho H_n$ близки друг к другу, то оценка ρH с помощью выражения (11) может оказаться достаточно точной. Ещё более точной оценивается ρH с помощью сплайн-интерполяции [3.3], причём интерполируется в этом случае функция F^{-1} . Коэффициенты сплайн-интерполяции a_i, b_i, c_i, d_i , $i=1..n$ находятся на стадии калибровочных измерений.

Аналитический подход близок к реализации метода обратных функций, он основан на описании зависимости $Y(\rho H)$ с помощью выражения

$$Y(\rho H) = \left(\frac{A}{1 + B\rho H + C(\rho H)^2} + 1 \right) D\rho H, \quad (2.10)$$

где A, B, C, D – коэффициенты аппроксимации, которые зависят от $E_{\max}$, эффективного атомного номера ослабляющего материала Z , материала и толщины чувствительного объёма детектора и т.п. Выражение (2.10) представляет собой уточнение аппроксимаций из работ [32, 34]. Коэффициенты A, B, C, D определяются на стадии калибровки. В процессе формирования и трансформации радиографического изображения стального каната для каждой точки изображения находится решение уравнения (12) с измеренной левой частью относительно неизвестной ρH . Для ускорения решения уравнений вида (12) могут быть использованы реализации метода обратных функций, описанные выше.

Метод дуальных энергий изначально предназначен для коррекции ужесточения пучка рентгеновского излучения. Применительно к испытанию стальных канатов указанный метод достаточно подробно рассмотрен в работах [29, 30]. В процессе сканирования формируются два радиографических изображения для двух специально подобранных максимальных энергий рентгеновского излучения. В результате совместной обработки исходных изображений формируются два изображения МДЭ – **A** и **B**, которые практически не зависят от максимальных энергий рентгеновского излучения. Изображение **A** представляет собой изображение оценки параметра ρH . Изображение **B** дополнительно чувствительно к эффективному атомному номеру Z .

Выбор способа коррекции анализируемого фактора определяется диаметром каната и требованиями к обнаружению и идентификации дефектов каната и их допустимости. Наиболее универсальным является метод дуальных энергий.

На выходе алгоритма коррекции формируется изображение Y^* , которое может быть описано следующим образом

$$\mathbf{Y}^* = \{\rho H_{nm}^*; m = 1..M; n = 1..N\}. \quad (2.11)$$

В дальнейшем именно изображение $\mathbf{Y}^*$ подвергается обработке с целью обнаружения дефектов канатов, их идентификации и обоснования их допустимости. Ниже обсудим положения, на которых базируется анализ радиографических изображений стальных канатов.

2.5 Анализ радиографических изображений стальных канатов

В работах [28,30] предложено в алгоритмах анализа радиографической информации применительно к стальным канатам использовать близость некоторых характеристик для всех единичных сечений эталонного каната или участков каната длиной, равной шагу свивки. Назовём упомянутые характеристики инвариантами стальных канатов, а применительно к радиографическим изображениям – инвариантами радиографических изображений стальных канатов. Более подробно обсудим предложение из [28, 30]. Каждая прядь до свивки может быть вписана в круговой цилиндр. В огрублённом приближении можно рассматривать модель каната как изделие, свитое из нескольких идентичных прядей. В указанной трактовке изображение одного сечения модельного каната получается из изображений любых других сечений поворотом относительно оси каната на строго определённый угол. Указанный угол зависит от угла и шага свивки прядей, расстояния между сечениями, диаметров каната и прядей, конструкции каната. Учёт конструкций прядей существенно усложняет понимание процесса формирования и анализа радиографических изображений стальных канатов. Сформулируем несколько очевидных предварительных замечаний, связанных с некоторыми инвариантами радиографических изображений стальных канатов.

Из анализа типичного радиографического изображения стального каната, приведённого на рисунке 2.3, можно сделать замечания.

Замечание 1. Существует ось симметрии теневого изображения стального каната.

Наличие указанной оси симметрии порождает существование целого ряда инвариантов цифровых радиографических изображений стальных канатов. На изображении стального каната введём прямоугольную систему координат OXY . Ось OX является осью симметрии теневого изображения каната. Введём функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$, ограничивающие изображение стального каната сверху и снизу. Можно сформулировать следующее замечание относительно функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$.

Замечание 2. Функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ являются периодическими, они связаны друг с другом соотношением $f_1(x) = -f_2(x)$.

К инвариантам, определяемым по функциям $f_1(x)$ и $f_2(x)$ относятся: максимальный поперечный размер тени каната на изображении D_{max} ; минимальный поперечный размер тени каната на изображении D_{min} ; расстояние L между положениями соседних максимумов и минимумов анализируемых функций.

На изображении 2.3 достаточно чётко выделяются границы прядей. Дополнительные инварианты связаны с этим фактом и с существенным отличием максимальных яркостей фрагментов изображения Y_F . Например, в качестве инварианта может быть выбрано расстояние L_w между центрами светлых пятен, расположенных на оси теневого изображения каната.

Ещё одно замечание связано с постоянством некоторой массовой характеристики стального каната. Очевидно, что отрезки каната одной и той же длины имеют одинаковую массу. Переформулируем это замечание применительно к анализу конечного радиографического изображения стального каната.

Замечание 3. Масса W части эталонного стального каната, ограниченной пучком рентгеновского излучения в процессе формирования единичной строки результирующего радиографического изображения, является практически неизменной.

Условно назовём W массой сечения каната. Анализ классических радиографических изображений или одного из конечных изображений метода дуальных энергий (формула (2.11)) позволяет оценить массу сечения каната с высокой точностью [31].

К задачам, решаемым с помощью цифровой радиографии, относятся: выявление различного рода дефектов; измерение размеров дефектов в направлении сканирования и в перпендикулярном направлении; идентификация дефектов. Под идентификацией дефектов понимается отнесение его к одному из типов дефектов. В работе [28] рассматриваются подходы, связанные с идентификацией некоторых дефектов стальных канатов: обрыв проволоки, износ, сплющивание каната, местное увеличение диаметра каната, коррозия. Указанные подходы базируются на формировании изображений дефектных областей. Очевидно, что идентификация некоторых типов дефектов может быть непосредственно связана с анализом отклонений от номинальных значений (индекс *nor*) инвариантов радиографических изображений стальных канатов. В таблице 2.1 приведено соответствие наиболее распространённых типов дефектов с инвариантами, описанными выше, для стальных канатов с органическими сердечниками. В таблице 2.1 также указаны визуальные признаки дефекта и рекомендации по применению дополнительных или альтернативных методов контроля стальных канатов.

Заключение к разделу 2. Совокупность выражений (2.1)–(2.11) последовательно описывает особенности процесса формирования и анализа цифровых изображений стальных канатов, что позволяет использовать их для дальнейших исследований в области разработки алгоритмов обработки радиографических изображений, целью которых является повышение вероятности обнаружения дефектов стальных канатов и правильности их идентификации. Полученные результаты будут способствовать совершенствованию методов неразрушающего контроля стальных канатов на стадии их изготовления и в процессе эксплуатации с целью повышения долговечности и безопасности. Проектирование систем цифровой радиографии

стальных канатов невозможно без корректного выбора и оценки параметров и характеристик анализируемых систем.

Таблица 2.1 – Соответствие инвариантов радиографических изображений стальных канатов с основными типами дефектов

Основной инвариант	Дефект	Визуализация дефекта
Плавное изменение яркости во фрагментах изображения	Обрыв проволоки	Более светлое пятно на окружающем фоне, $Y_F > Y_{nor}$
Максимальный поперечный размер тени каната на изображении	Расплющивание	$D_{max} > D_{nor}$ или $D_{max} < D_{nor}$, но $W \approx W_{nor}$
Масса сечения каната	Износ	$W < W_{nor}$
Максимальный поперечный размер тени каната на изображении	Местное увеличение диаметра каната	$D_{max} > D_{nor}$, $W \approx W_{nor}$, яркость центральной части каната близка к номинальной, увеличение различий яркости по фрагментам изображения
Максимальный поперечный размер тени каната на изображении	Коррозия внутренних областей каната	$D_{max} > D_{nor}$, $W \approx W_{nor}$, различия яркости по фрагментам изображения. Рекомендуется применение МДЭ
Максимальный поперечный размер тени каната на изображении	Местное уменьшение диаметра каната за счёт органического сердечника	$D_{max} < D_{nor}$, $W \approx W_{nor}$
Симметрия изображения	Излом каната	Нарушение симметрии или появление более тёмных участков изображения. Рекомендуется несколько ракурсов
Максимальный поперечный размер тени каната на изображении	Инородное включение	$D_{max} > D_{nor}$ и $W > W_{nor}$
Яркость фрагментов изображения	Выпирание отдельных прядей или проволок	$D_{max} > D_{nor}$. Рекомендуется несколько ракурсов
Расстояние между центрами светлых пятен, расположенных на оси теневого изображения каната	Удлинение каната	$L_w > L_{w\,nor}$ и $L > L_{nor}$, $\Sigma W = \Sigma W_{nor}$

3 Выбор оптимальных энергий рентгеновского излучения в системах цифровой радиографии стальных канатов

В предыдущих разделах подчеркнуто, что поддержание на заданных уровнях надежности и безопасности стальных канатов подъемно–транспортных машин, промышленных, жилищных и транспортных сооружений невозможно без постоянной и регулярной оценки технического состояния канатов на основе различных видов неразрушающих испытаний [32,33]. На практике стальные канаты контролируют визуальными, магнитными, электромагнитными, тепловыми, акустическими, радиационными и другими методами [32–40]. Одним из наиболее эффективных методов, позволяющих оценивать структуру стальных канатов и выявлять разнообразные дефекты, является цифровая радиография [40–41]. Стальные канаты отличаются большим разнообразием конструкций и размеров [42]. Остается актуальным вопрос оценки и выбора основных параметров и характеристик систем цифровой радиографии применительно к контролю стальных канатов. К указанным параметрам и характеристикам, связанным друг с другом, относится погрешность оценки диаметра каната, производительность контроля, максимальная энергия рентгеновского излучения.

3.1 Параметры стальных канатов

Стальные канаты имеют организованную сложную пространственную структуру. Для решения сформулированной выше задачи можно абстрагироваться от внутренней структуры каната, используя две основные его характеристики: диаметр – D [мм] и массу одного метра каната диаметром D – $m(D)$ [кг/м]. В качестве дополнительной характеристики может быть использована суммарная площадь сечения всех проволок каната S [мм]. Стальные цилиндры с некоторыми эффективными диаметрами D_m или D_S являются моделями канатов достаточно близкими к реальности. Эффективные

диаметры D_m и D_s связаны с диаметром каната D и массой m или площадью S простыми соотношениями

$$D_m = 0,001 \sqrt{\frac{4m(D)}{\pi \rho}}, D_s = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (3.1)$$

здесь ρ – плотность материала проволок стального каната в $[\text{кг/м}^3]$.

В таблице 3.1 приведены результаты расчетов эффективных диаметров стальных канатов D_m и D_s с помощью формул (3.1) для части диапазона диаметров канатов из сборника стандартов [42].

Из анализа данных, представленных данных в таблице 3.1, следует вывод о незначительном превышении эффективного диаметра, рассчитанного по массе одного метра каната, относительно эффективного диаметра, рассчитанного по суммарной площади сечения всех проволок каната. Причиной указанного превышения может быть то, что масса 1 метра каната в таблице 3.1 приведена с учетом смазки каната.

Таблица 3.1 – Эффективный диаметр канатов [42]

Диаметр каната, D , мм	Площадь сечения всех проволок, S , мм ²	Масса 1 метра каната, $m(D)$, кг/м	D_m , мм	D_s , мм
5,1	9,76	0,0955	3,93	3,53
6,2	14,47	0,1416	4,79	4,29
8,3	26,15	0,2560	6,44	5,77
11	47,19	0,4616	8,65	7,75
15,0	86,28	0,8440	11,69	10,48
21,0	167,03	1,6530	16,36	14,58
24,0	215,49	2,110,0	18,49	16,56
30,5	256,72	3,4900	23,78	18,08
37,0	512,79	5,0150	28,50	25,55
42,0	668,12	6,5350	32,54	29,17
47,5	861,98	8,4300	36,95	33,13
51,0	976,03	9,5450	39,32	35,25
56	1190,53	11,650	43,44	38,93

3.2 Теоретические основы

Стальной канат является протяженной структурой. Различные реализации цифровой радиографии отличаются видом регистратора рентгеновского излучения. Среди которых наиболее приемлемыми являются линейки и матрицы (панели) радиометрических детекторов. Для неразрушающих испытаний протяженных объектов контроля (ОК) возможно применение сканирующей цифровой радиографии (СЦР) и цифровой радиографии на основе матричных детекторов (МЦР).

В методе СЦР цифровое радиографическое изображение формируется в результате сканирования ОК перемещающимся узким (щелевым) пучком рентгеновского излучения. Системы МЦР предназначены контроля таких ОК, тень которых не выходит за границы матричного регистратора. В силу ограниченности физических размеров панелей радиометрических детекторов статичный режим формирования протяженных объектов затруднен. Возможны два подхода к контролю стальных канатов с помощью систем МЦР – дискретное и непрерывное сканирование. В первом подходе через определенные интервалы времени формируется набор изображений последовательных участков каната, которые анализируются отдельно или в целом после операции склеивания (объединения). Указанный подход сложен в реализации, так как требует точного позиционирования объекта относительно системы источник – детектор. Непрерывное сканирование для систем МЦР организуется аналогично системам СЦР, различие заключается в необходимости применения специального алгоритма усреднения в процессе формирования результирующего изображения.

3.2.1 Формирование изображений в системах сканирующей цифровой радиографии стальных канатов

В разделе 3.1 отмечено, что простейшей геометрической моделью стального каната является протяженный стальной круговой цилиндр эффективным диаметром D_S или D_5 .

На рисунке 3.1.a приведена типичная схема сканирования протяженных объектов узким (щелевым) пучком рентгеновского излучения и схема радиографических изображений. Система СЦР (рисунок 3.1.a) состоит из источника рентгеновского излучения 1 с радиационной защитой 2 и щелевым коллиматором 3, объекта контроля 4 с протягивающим устройством и линейки радиометрических детекторов 6 со щелевым коллиматором 5.

С изображением (рисунок 3.1.b) связывают ортогональную систему координат, в которой ось x параллельна направлению сканирования, а ось y перпендикулярна оси x . Радиографическое изображение представляет собой матрицу размером $N_x \times N_y$, здесь N_x – число столбцов в матрице, а N_y – число строк, которое совпадает с количеством детекторов в линейке.

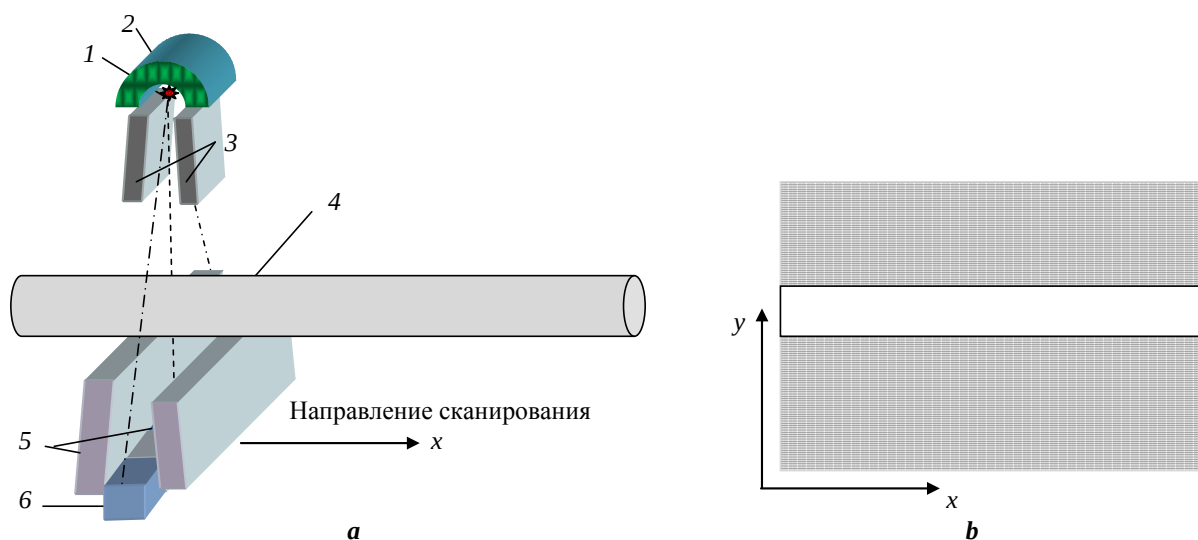


Рисунок 3.1 – Формирование радиографических изображений протяженных объектов:

a – схема сканирования; b – схема изображения

Возможно сканирование в двух режимах – дискретном и непрерывном. Непрерывное сканирование является более легко реализуемым. Характеристикой, определяющей производительность контроля, является время формирования t_0 единичной строки цифрового радиографического изображения. Процесс формирования состоит из нескольких последовательных этапов трансформации энергии рентгеновского излучения. На первом этапе за время t_0 каждому детектору линейки передается энергия J от фотонов, испытавших взаимодействие с материалом детектора. На последующих этапах энергия J преобразуется в энергию света, а затем в энергию электрического сигнала, который после усиления поступает на вход аналогово–цифрового преобразователя. В результате формируется исходное цифровое радиографическое изображение J с элементами $J(x,y)$.

Радиометрические детекторы отличаются друг от друга уровнями собственных шумов, чувствительными объемами, коэффициентами усиления. Для уменьшения влияния указанных различий последовательно применяют калибровки по «чёрному», по «белому». В случае использования в качестве источников рентгеновского излучения импульсных источников перед калибровкой по «белому» осуществляется нормировка на откалиброванный по «черному» цифровой сигнал с опорного канала.

В результате калибровок из J формируется промежуточное радиографическое изображение I , которое после трансформации с помощью логарифмирования преобразуется в конечное радиографическое изображение P , поступающее на вход алгоритма анализа цифровых радиографических изображений. Выражение для аналитической связи элементов изображений I и P в введенной ортогональной системе координат выглядит следующим образом

$$I(x, y) = I_0(x, y)e^{-P(x, y)} \quad (3.2)$$

здесь (x,y) – координаты точки изображения;

$I_0(x,y)$ – элемент изображения в точке (x,y) без объекта контроля.

Оценки $I(x,y)$ и $P(x,y)$ имеют ярко выраженную физическую природу: $I(x,y)/I_0(x,y)$ – степень ослабления фотонов объектом контроля по линии, соединяющей излучающую точку с точкой (x,y) ; $P(x,y)$ – соответствующее значение радиационной толщины ОК.

Замечание 1. Принципиальное различие формирования изображений в МЦР по сравнению с системами СЦР связано с отсутствием коллиматоров источников и регистраторов рентгеновского излучения. Для систем МЦР вклад фотонов, рассеянных в ОК и регистрируемых каждым отдельным детектором матрицы, в радиометрический сигнал может во много раз превышать аналогичную величину для систем СЦР. Указанный фактор приводит к снижению радиационного контраста и ухудшению разрешающей способности систем МЦР.

Выражение (2) может послужить основой выбора максимальной энергии рентгеновского излучения. Необходимо определиться с критерием оптимизации.

3.2.2 Критерий оптимизации

Критерии оптимизации в цифровой радиографии связывают с одной из основных измерительных задач применительно к ОК. В качестве ОК будем рассматривать стальной круговой цилиндр эффективным диаметром D_s . Измерительной задачей является, например, определение максимальной толщины ОК, которая в рассматриваемом случае соответствует эффективному диаметру D_s . С учетом сказанного в качестве критерия выбора максимальной энергии рентгеновского излучения может выступить минимум относительной погрешности измерения диаметра исследуемого ОК. Для формализации указанного критерия трансформируем уравнение (2) с учетом однородности материала объекта для луча, проходящего перпендикулярно оси цилиндра,

$$I = I_0 e^{-\mu_{\text{int}}(E_{\text{max}}, D_s) D_s} \quad (3.3)$$

здесь $\mu_{int}(E_{max}, D_S)$ – интегральный линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения [43] с максимальной энергией E_{max} барьером из стали толщиной D_S . Для получения конечного выражения для оценки относительной погрешности оценки D_S воспользуемся подходом, основанным на разложении (3) по малым приращениям и подробно изложенным в работе [12]. Искомое выражение имеет вид

$$\delta^2 D_S = \frac{\sigma^2 I}{\bar{I}^2 (\mu_{diff}(E_{max}, D_S) D_S)^2} \quad (3.4)$$

где $\mu_{diff}(E_{max}, D_S)$ – дифференциальный линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения [43] с максимальной энергией E_{max} барьером из стали толщиной D_S ; $\bar{I}, \sigma^2 I$ – среднее значение и дисперсия соответствующего радиометрического сигнала. Сигнал с радиометрического детектора пропорционален величине энергии, оставленной в детекторе зарегистрированными фотонами, поэтому выражение (3.4) может быть записано следующим образом

$$\delta^2 D_S = \frac{\eta^2(E_{max}, D_S)}{N(E_{max}, D_S) (\mu_{diff}(E_{max}, D_S) D_S)^2} \quad (3.5)$$

здесь η – коэффициент накопления флуктуаций [45];

$N(E_{max}, D_S)$ – число фотонов рентгеновского излучения с максимальной энергией E_{max} , прошедших через стальной барьер толщиной D_S и зарегистрированных радиометрическим детектором.

Для использования формулы (3.5) на практике необходимо иметь аналогичные выражения для вычисления указанных в ней зависимостей.

Формула для определения числа фотонов, зарегистрированных детектором, имеет вид

$$N(E_{max}, D_S) = N_0 \int_0^{E_{max}} f(E, E_{max}) e^{-\mu(E) D_S} \varepsilon(E, h_d) dE, \quad (3.6)$$

здесь N_0 – число фотонов рентгеновского излучения, падающих на фронтальную поверхность радиометрического детектора за время измерения в

отсутствие объекта контроля; $f(E, E_{max})$ – числовой энергетический спектр источника рентгеновского излучения; $\mu(E)$ – линейный коэффициент ослабления излучения с энергией E сталью; $\varepsilon(E, h_d)$ – эффективность регистрации фотонов с энергией E детектором толщиной h_d .

Зависимости $\mu_{int}(E_{max}, D_S)$ и $\mu_{diff}(E_{max}, D_S)$ оценивается с помощью выражений

$$\mu_{int}(E_{max}, D_S) = -\frac{1}{D_S} \ln \frac{\int_0^{E_{max}} \overline{E_{ab}}(E) f(E, E_{max}) e^{-\mu(E) D_S} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_0^{E_{max}} \overline{E_{ab}}(E) f(E, E_{max}) \varepsilon(E, h_d) dE}, \quad (3.7)$$

$$\mu_{diff}(E_{max}, D_S) = \frac{\int_0^{E_{max}} \overline{E_{ab}}(E) \mu(E) f(E, E_{max}) e^{-\mu(E) D_S} \varepsilon(E, h_d) dE}{\int_0^{E_{max}} \overline{E_{ab}}(E) f(E, E_{max}) e^{-\mu(E) D_S} \varepsilon(E, h_d) dE}, \quad (3.8)$$

здесь $\overline{E_{ab}}(E)$ – среднее значение энергии, переданной детектору зарегистрированным фотоном [45].

Квадрат коэффициента накопления флуктуаций вычисляется по следующей формуле

$$\eta^2(E_{max}, D_S) = \frac{\int_0^{E_{max}} \overline{E_{ab}^2}(E) f(E, E_{max}) e^{-\mu(E) D_S} \varepsilon(E, h_d) dE \int_0^{E_{max}} f(E, E_{max}) e^{-\mu(E) D_S} \varepsilon(E, h_d) dE}{\left(\int_0^{E_{max}} \overline{E_{ab}}(E) f(E, E_{max}) e^{-\mu(E) D_S} \varepsilon(E, h_d) dE \right)^2}, \quad (3.9)$$

где $\overline{E_{ab}^2}(E)$ – среднее значение квадрата энергии, переданной детектору зарегистрированным фотоном [45].

Для описания числового энергетического спектра можно использовать формулу Крамерса с поправкой на толщину ослабляющего фильтра, используемого в конкретном источнике рентгеновского излучения [44]. Для вычисления энергетических зависимостей линейных коэффициентов ослабления фотонов сталью и материалом детектора используются базы данных по ослаблению гамма-излучения, например, [47]. Энергетические зависимости $\overline{E_{ab}}(E)$, $\overline{E_{ab}^2}(E)$ могут быть оценены с помощью данных из [45].

Критерий выбора оптимальной энергии рентгеновского излучения описывается выражением

$$\min_{E_{\max}} \delta D_S(E_{\max}, D_S) = \delta D_S(E_{\text{opt}}, D_S) \quad (3.10)$$

3.3 Расчет оптимальных энергий

Критерий выбора оптимальных энергий, основанный на уравнении (3.10), нуждается в предварительном исследовании зависимости $\delta(E_{\max})$. Эффективный диаметр каната D_S изменяли от 5 до 35 мм, максимальную энергию $E_{\max}$ варьировали от 80 кэВ до 2080 кэВ. На рис. 3.2 непрерывными линиями обозначены зависимости $\delta(E_{\max})$. Погрешности измерения диаметра цилиндрического ОК δ приведены из условия попадания на фронтальную поверхность единичного детектора 10^4 фотонов. Из анализа графических зависимостей можно сделать вывод об уменьшении выраженности оптимума зависимостей $\delta(E_{\max})$ с возрастанием диаметра ОК.

Замечание 2. При выборе максимальных энергий рентгеновского излучения в ряде случаев нет необходимости соблюдать условие $E_{\max} = E_{\text{opt}}$. Допустимо в качестве $E_{\max}$ выбирать значение, удовлетворяющее ограничению

$$\delta(E_{\max}) \leq (1 + \alpha) \delta(E_{\text{opt}}) \quad (3.11)$$

здесь $\alpha > 1$ характеризует уровень возможного превышения погрешности измерения диаметра ОК.

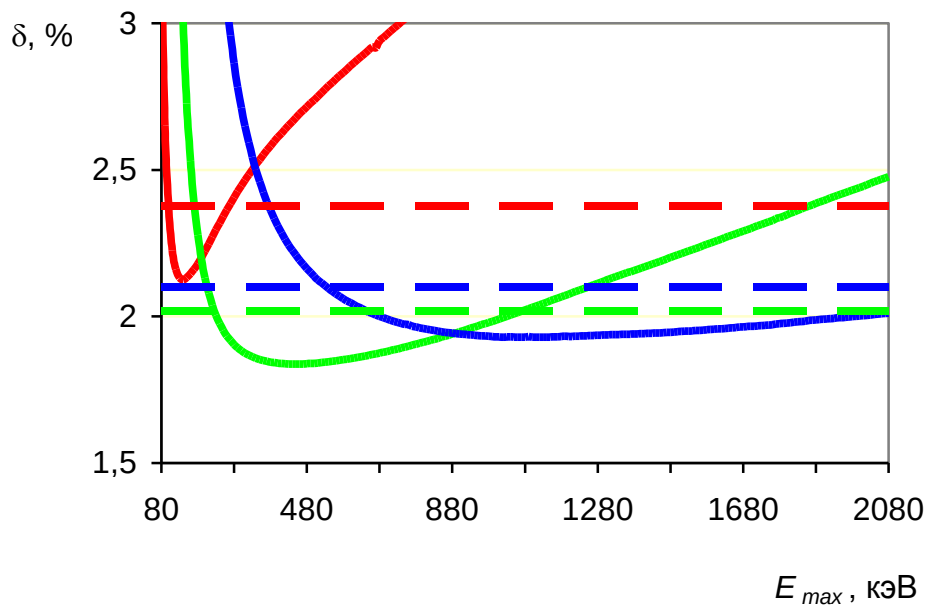


Рисунок 3.2 – Зависимости $\delta(E_{max})$:

- $D_s=5 \text{ мм}$, — — уровень + 10 %;
- $D_s=15 \text{ мм}$, — — уровень + 10 %;
- $D_s=35 \text{ мм}$, — — уровень + 10 %

Упомянутые в замечании 2 случаи возникают, например, при выборе максимальной энергии рентгеновского излучения для заданного диапазона изменения диаметров стальных канатов без переустановки параметров системы цифровой радиографии или при отсутствии технической либо экономической возможности подобрать источник рентгеновского излучения.

На рисунке 3.2 пунктиром изображены уровни, соответствующие неравенству (3.11) для $\alpha=0,1$.

Для диапазона диаметров стальных канатов, приведенных в таблице 3.1, были найдены значения оптимальных максимальных энергий рентгеновского излучения E_{opt} по рассмотренному выше критерию (3.10). В качестве характерного размера для выражения (3.10) выбирали эффективный размер по площади сечения стальных проволок. В таблице 3.2 сведены результаты расчетов E_{opt} .

Таблица 3.2 – Оптимальная максимальная энергия рентгеновского излучения E_{opt}

Диаметр каната, d , мм	D_s , мм	E_{opt} , кэВ	$\delta(E_{opt})$, %
5,1	3,53	113	2,16
6,2	4,29	126	2,14
8,3	5,77	157	2,10
11	7,75	206	2,03
15,0	10,48	289	1,94
21,0	14,58	434	1,84
24,0	16,56	498 (450)	1,82 (1,82)
30,5	18,08	542 (450)	1,81 (1,82)
37,0	25,55	765 (450)	1,82 (1,91)
42,0	29,17	881 (450)	1,85 (2,00)
47,5	33,13	1017 (450)	1,90 (2,14)
51,0	35,25	1115 (450)	1,93 (2,22)
56	38,93	1437 (450)	1,98 (2,39)

В таблице 3.2 соответствующие значения погрешности измерения диаметра δ приведены для условия попадания на фронтальную поверхность единичного детектора 10^4 фотонов.

Из анализа данных, приведенных в таблице 3.2, следует необходимость использования для контроля стальных канатов большого диаметра источников высокоэнергетического рентгеновского излучения, но это не всегда удобно исходя из практических соображений. Наиболее распространенными источниками рентгеновского излучения в промышленности являются рентгеновские аппараты с максимальной энергией излучения, не превышающей 450 кэВ. В последнем столбце таблицы 3.2 в скобках жирным шрифтом выделены значения погрешности измерения эффективных диаметров стальных канатов для рентгеновского излучения с $E_{max}=450$ кэВ. Расхождение с оптимальными значениями погрешности не превышают 21 %, что свидетельствует в пользу возможности использования рентгеновского излучения с $E_{max}=450$ кэВ при контроле канатов диаметром свыше 24 мм.

3.4 Оценка производительности контроля стальных канатов

Производительность контроля стальных канатов методом цифровой радиографии зависит от многих факторов. К их числу относятся: плотность потока фотонов M , максимальная энергия рентгеновского излучения E_S ; максимальное расстояние от источника излучения до детекторов F ; толщина h_d и площадь фронтальной поверхности S_d чувствительных объемов единичных детекторов; предельная погрешность измерения эффективного диаметра δ_{lim} . Для вычисления производительности контроля необходимо знать N_0 . Формула для нее имеет вид

$$N_0 = \frac{MS_d t_0}{F^2} \quad (3.12)$$

Производительность контроля стальных канатов методом сканирующей цифровой радиографии R , [м/с] определяется временем формирования единичного столбца изображения t_0 и величиной перемещения в направлении сканирования x_d

$$R = \frac{x_d}{t_0} \quad (3.13)$$

Отметим, что величина x_d не может быть меньше размера чувствительного объема детектора в направлении просвечивания, в противном случае часть объекта проконтролирована не будет.

Результирующее выражение для оценки производительности контроля стальных канатов методом сканирующей цифровой радиографии R для выбранной максимальной энергии рентгеновского излучения E_S выводится из формул (3.3), (3.6), (3.12) и (3.13)

$$R = \frac{x_d MS_d \delta_{lim}^2 (\mu_{diff}(E_S, D_S) D_S)^2 \int_0^{E_S} f(E, E_S) e^{-\mu(E) D_S} \varepsilon(E, h_d) dE}{\eta^2(E_S, D_S) F^2} \quad (3.14)$$

Единственной сложностью вычисления производительности R является необходимость предварительной оценки плотности потока фотонов M . Это

обусловлено тем, что производители источников рентгеновского излучения не указывают эту характеристику. С достаточной для практических приложений точностью можно воспользоваться подходом к расчету M , основанным на знании электрической мощности, коэффициента полезного действия рентгеновского аппарата k (ГОСТ 20337–74) и эффективной энергии источника рентгеновского излучения. Значение k не превосходит нескольких процентов [49].

Пример расчета производительности. Исследуем возможность применения выражения (3.14) для расчета производительности контроля стальных канатов методом цифровой радиографии. Исходные данные: рентгеновский аппарат Bosello 450 мощностью 700 Вт и $E_{max}=450$ кэВ; фокусное расстояние $F = 1$ м; сцинтилляционный детектор $CdWO_4$ размерами $x_d = 0,2$ мм, $S_d = 0,2 \times 0,2$ мм², $h_d = 10$ мм; коэффициент полезного действия источника рентгеновского излучения $k=0,01$.

На рисунке 3.3 приведены результаты расчета производительности R для стальных канатов из таблицы 3.1. Приведенные на рисунке 3.3 результаты доказывают возможность практического применения цифровой радиографии для контроля стальных канатов в широком диапазоне изменения их диаметров с приемлемой для практики производительностью.

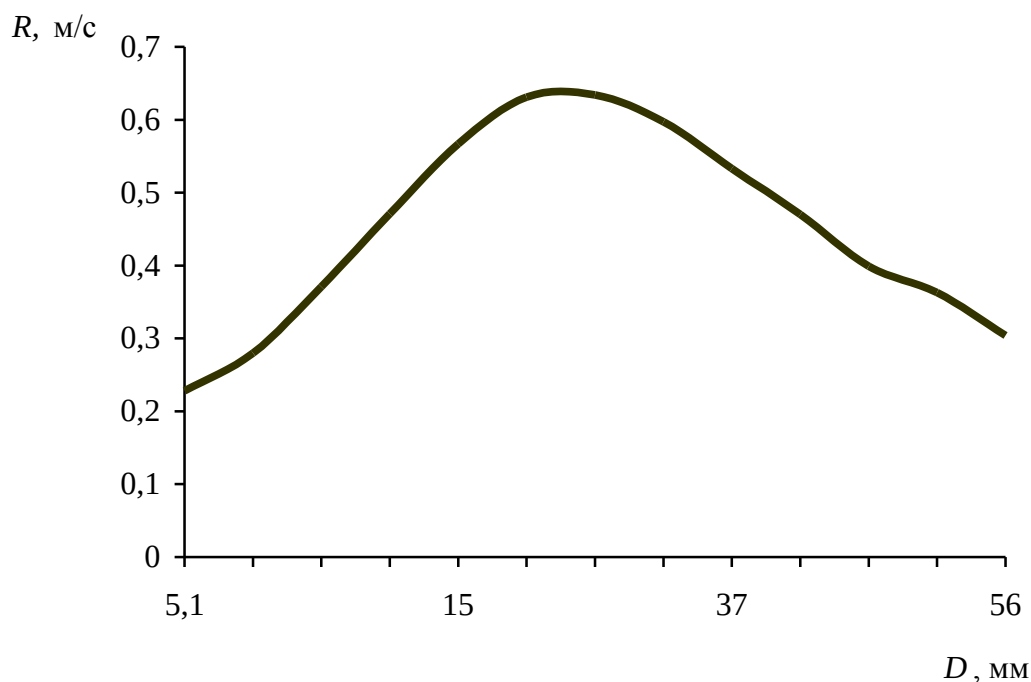


Рисунок 3.3 – Производительность контроля стальных канатов методом сканирующей цифровой радиографии

3.5 Выбор источника рентгеновского излучения.

Одним из важнейших вопросов является задача выбора источника рентгеновского излучения. Причем выбор осуществляется не только по максимальной энергии рентгеновского излучения, но и мощности излучения, так как она также существенным образом влияет на производительность контроля стальных канатов методом цифровой сканирующей радиографии.

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при выборе рентгеновского аппарата, является размер его фокального пятна. Указанный размер существенным образом влияет на разрешающую способность системы цифровой радиографии. Высокая разрешающая способность СЦР позволяет более точно детализировать фрагменты стального каната по его изображению и, следовательно, с более высокой точностью оценивать значения информативных параметров радиографических изображений.

В таблице 3.3 приведены краткие технические характеристики рентгеновских аппаратов для неразрушающего контроля, которые выпускаются ООО «Фотон» Томск.

Таблица 3.3 – Характеристики рентгеновских аппаратов ООО «Фотон»

Характеристики	РАП 160–5	РАП 200–5	РАП 220–5	РАП 300–5
Диапазон высокого U , кВ	40...160	80...200	50...220	70...300
Диапазон тока, мА	0,4...5	1...5	0,4...5	1,3...4,5
Макс. Мощность, кВт	0,6	1,0	1,1	1,2
Размеры фокусного пятна	1,2×1,2	2,0×2,2	2,0×2,0	2,5×2,5
Просвечивающая способность по стали, мм	19	28	35	50
Цена без НДС, руб.	436000	501000	534000	624000

Рентгеновские аппараты, указанные в таблице 3.3, не в полной мере удовлетворяют требованиям по максимальной энергии излучения и по размеру фокусного пятна для всего диапазона диаметров стальных канатов из таблицы 3.1. В таблице 3.4 приведены характеристики высокоэнергетических рентгеновских аппаратов.

Таблица 3.4 – Характеристики высокоэнергетических рентгеновских аппаратов

Характеристики	Bosello 450	Арион 600	ISOVOLT 450/10	COMET XRS–600
Номинал высокого U , кВ	450	600	450	600
Номинал тока, мА	2	0,3	3,7	4,1
Макс. мощность, кВт	1,5	0,2	1,68	0,7
Размеры фокусного пятна	0,4×1,0	3	1,5	0,7
Просвечивающая способность по стали, мм	60	100	60	100
Цена без НДС, руб.	Нет информации	548000	Нет информации	>1500000

3.6 Результаты экспериментов

Для оценки возможности применения полученных результатов на практике были получены цифровые радиографические изображения стальных канатов диаметром 24 мм. Эффективный диаметр такого каната 16 мм. Радиографические изображения формировались на цифровой панели Perkin Elmer с физическим размером пикселя $0,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$ и толщиной чувствительного объема детектора 2 мм для MXR-451HP/11 (COMET) — источника рентгеновского излучения с регулируемой максимальной энергией от 50 до 450 кэВ и мощностью 700 Вт. Время экспозиции рано одной секунде. Оптимальная максимальная энергия рентгеновского излучения для такого каната близка к 500 кэВ. В соответствии с подходом, основанным на выражении (3.3), и данными, приведенными на рисунке 3.2, можно сделать заключение о том, что понижение максимальной энергии рентгеновского излучения до уровня 250–300 кэВ для рассматриваемого ОК приводит к ухудшению погрешности не более чем на 10 % по сравнению с минимальным значением. На рисунке 3.4 приведены радиографические изображения стальных канатов для максимальных энергий рентгеновского излучения 200, 250 и 300 кэВ. Сравнение приведенных изображений подтверждает этот указанный выше вывод.

Радиографические изображения стальных канатов, приведенные на рисунке 3.4, получены с различных ракурсов.

Для иллюстрации сложности пространственной структуры стальных канатов на рисунке 3.5 и их сопоставления для различных методов приведены оптическая цифровая фотография и цифровое радиографическое изображение стального каната [48] диаметром 24 мм для $E_{max}=300 \text{ кэВ}$.

Общий ход всех прядей стального каната в свивке вполне отчетливо просматривается и соответствует оптическому изображению. На радиографическом изображении наблюдается существенное различие яркости фрагментов изображения и мелкоструктурный шум, обусловленный

недостаточным геометрическим разрешением системы цифровой радиографии, что усложняет выявление многих типов дефектов, описанных в [40]. Следует отметить, что внешний вид и качество радиографического изображения не зависит от ракурса (смотреть на рисунке 3.4).

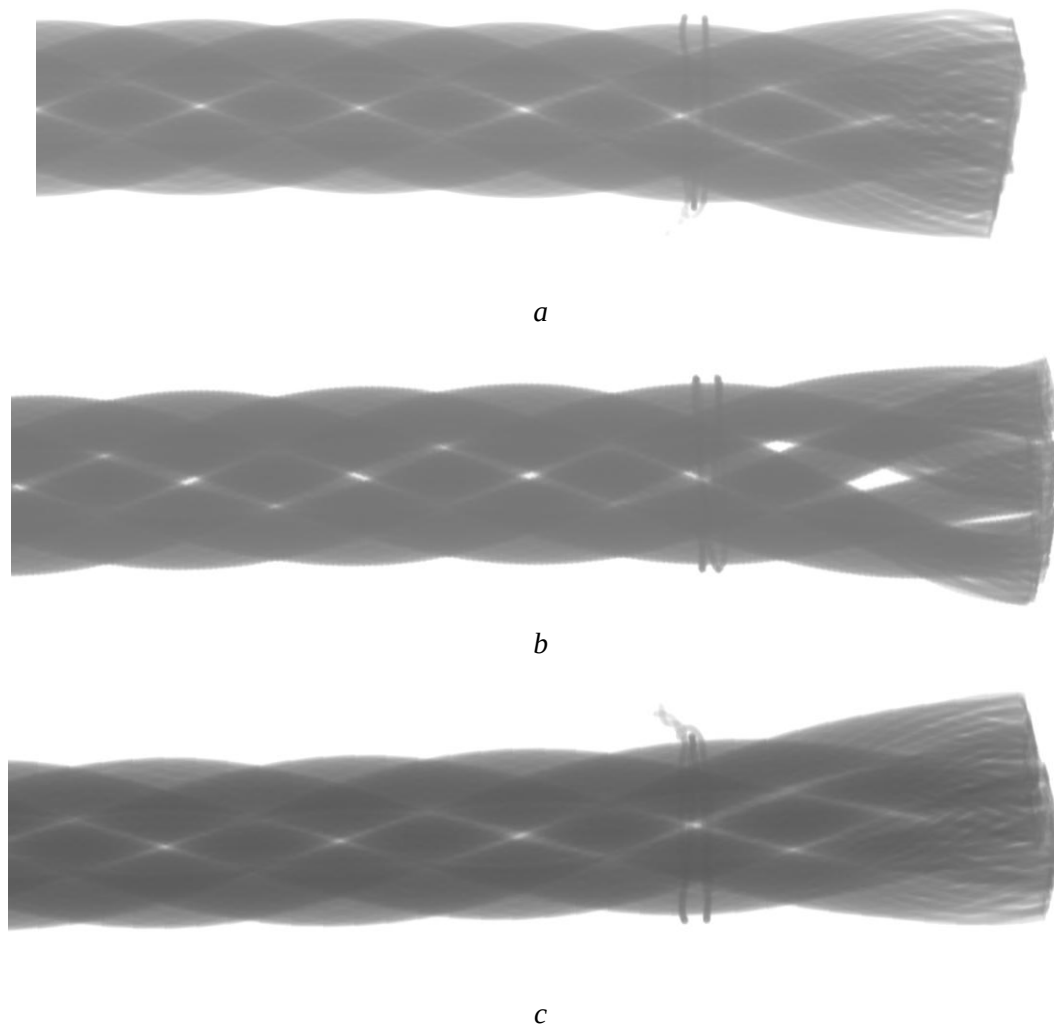
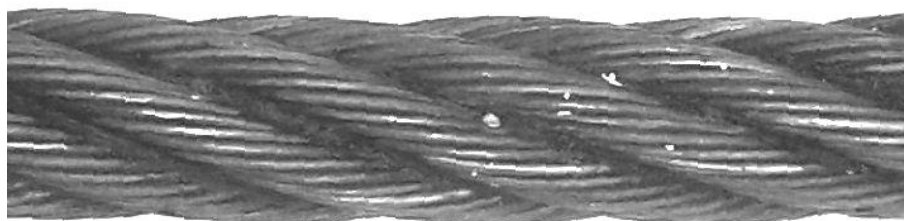


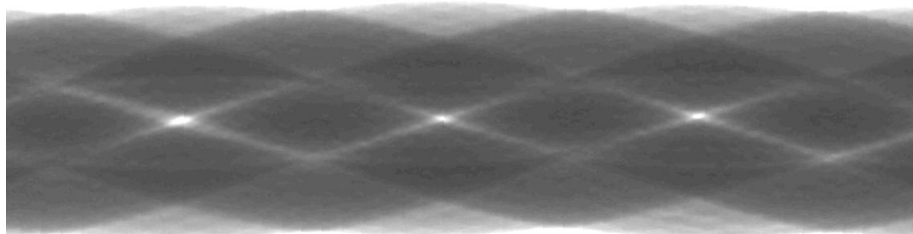
Рисунок 3.4 – Радиографические изображения стальных канатов.

Максимальные энергии рентгеновского излучения:

a – 200 кэВ; *b* – 250 кэВ; *c* – 300 кэВ



a



b

Рисунок 3.5 – Изображения стального каната диаметром 24 мм:

a – фотография; *b* – цифровая радиография

3.7 Информативные параметры радиографических изображений стальных канатов

В разделе 2.5 вкратце обсуждено то, какую информацию можно извлечь из радиографических изображений стальных канатов. В обсуждении исходили из специфики стальных канатов как объектов контроля. Обсудим вопросы повышения информативности радиографических изображений стальных канатов подробнее и более детально.

На типичных радиографических изображениях стального каната (рисунки 3.4 и 3.5.*b*) можно выделить ряд повторяющихся элементов структуры, как в поперечном направлении, так и в продольном направлении. Параметры упомянутых структур характеризуют стальной канат, то есть являются информативными параметрами метода цифровой радиографии применительно к испытаниям стальных канатов.

Цифровое радиографическое изображение стального каната методом калибровки по стальному стержню эквивалентного диаметра преобразуется в соответствующее двумерное распределение толщины **H**. Доказать наличие и

повторяемость структурных элементов возможно в результате анализа всего изображения **Н**, но наиболее просто это сделать анализируя изображение по строкам и по столбцам.

На рисунке 3.6 для иллюстрации приведены распределения толщины стального каната по нескольким строкам изображения **Н**.

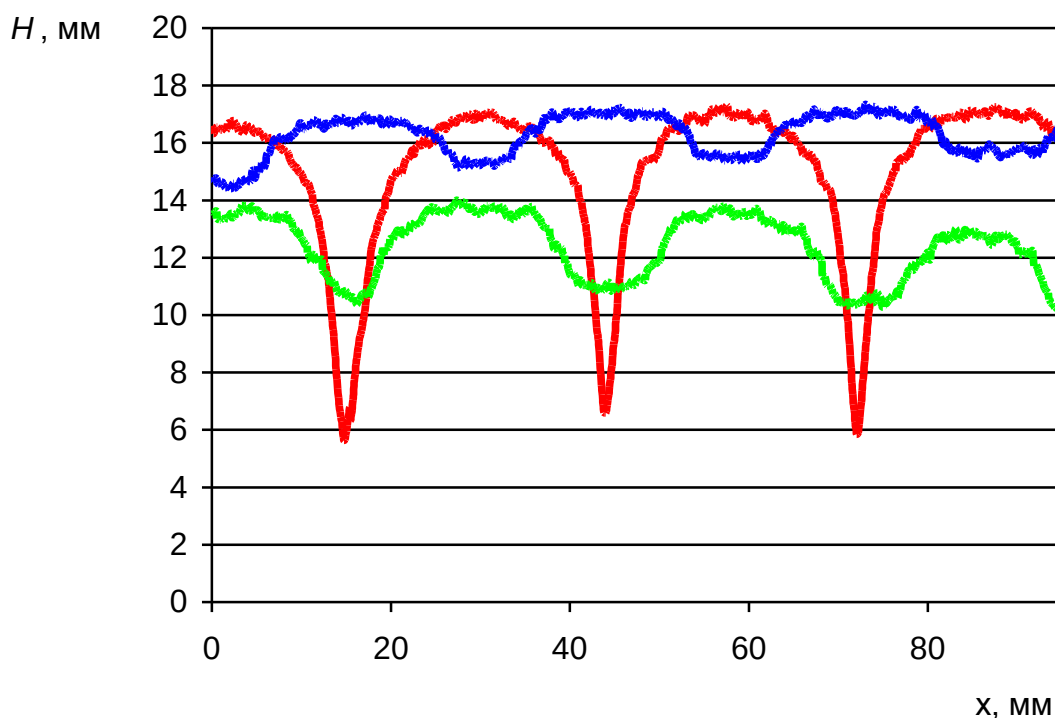


Рисунок 3.6 – Распределение толщины стального каната по строкам:

- по оси изображения каната;
- 3 мм от оси изображения каната;
- 6 мм от оси изображения каната

Распределение толщины по осевой строке изображения стального каната близко к периодической функции. В качестве информативных параметров можно взять длину периода, положения и значения максимумов и минимумов. Распределения толщины по строкам, отступающим от осевой строки на 3 и 6 мм, имеют похожий характер и их информативные параметры такие же, как и для осевой строки. Существенного различия распределений для строк,

отступающих от осевой строки на одинаковое расстояние вверх или вниз, не наблюдается.

На рисунке 3.7 приведены распределения толщины стального каната по характерным столбцам изображения **Н**. К числу характерных столбцов первого типа относятся столбцы, для которых поперечный размер изображения максимален, к этим же столбцам изображения принадлежат точки оси изображения каната, где толщина минимальна. Для столбцов второго типа поперечный размер изображения каната минимален.

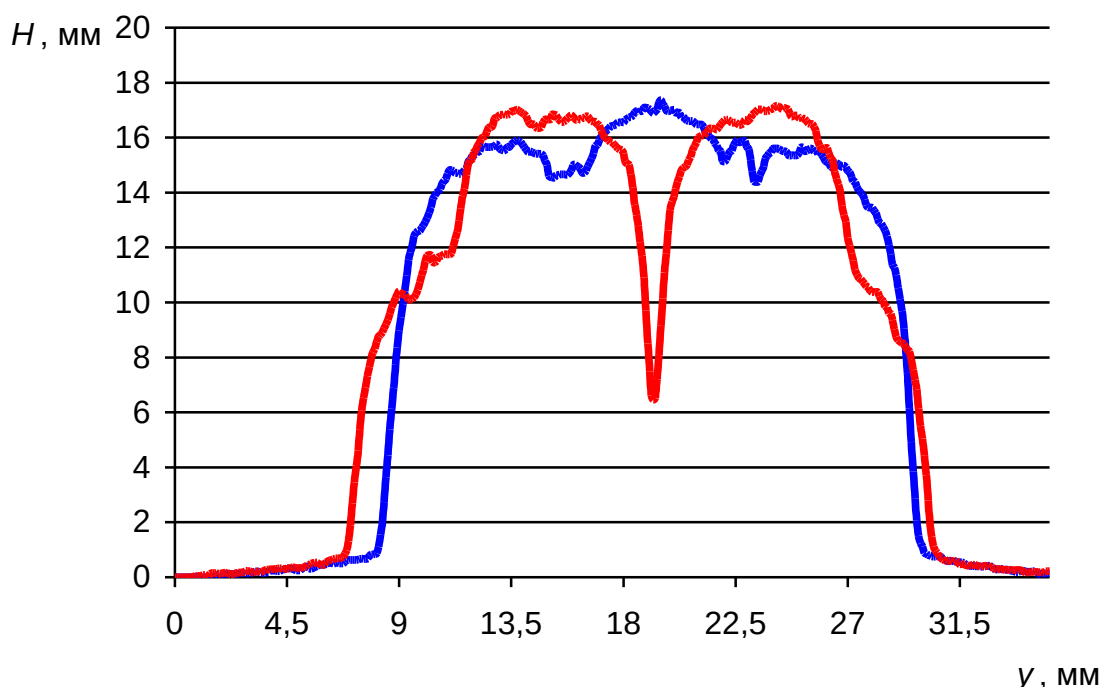


Рисунок 3.7 – Распределение толщины стального каната по характерным столбцам:

— столбцы первого типа; — столбцы второго типа

Распределения толщин для характерных столбцов одного и того же типа близки друг к другу. В качестве информативных параметров могут быть использованы положения и значения максимумов и минимумов и степени асимметрии.

Все указанные информативные параметры радиографических изображений стальных канатов могут быть использованы в процессе отладки

технологий изготовления стальных канатов с повышенными потребительскими свойствами, а также на этапах оценки технического состояния канатов в процессе их длительной эксплуатации.

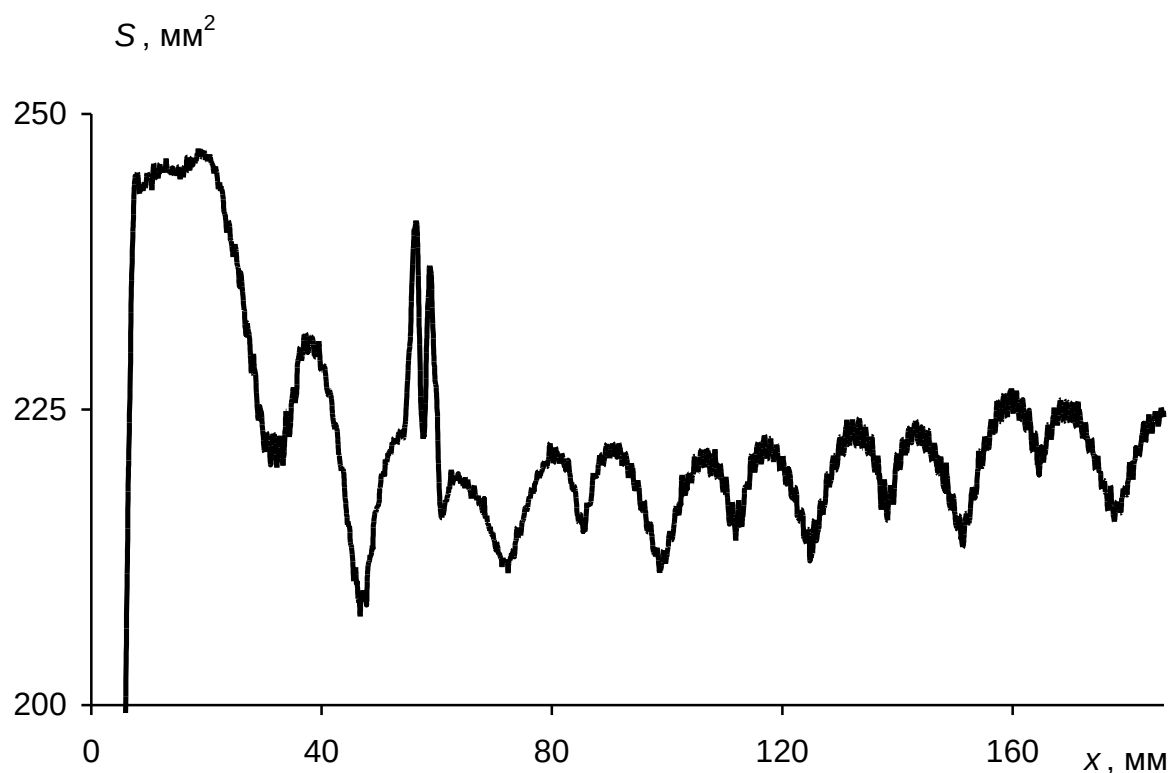
Распределения толщин для характерных столбцов одного и того же типа близки друг к другу. В качестве информативных параметров могут быть использованы положения и значения максимумов и минимумов и степени асимметрии.

Все указанные информативные параметры радиографических изображений стальных канатов могут быть использованы в процессе отладки технологий изготовления стальных канатов с повышенными потребительскими свойствами, а также в процессе оценки технического состояния канатов.

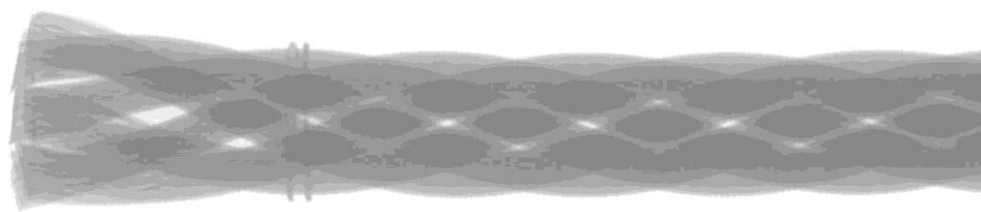
В работе [48] предложен способ измерения массы объекта методом цифровой радиографии. С помощью указанного способа по одной строке радиографического изображения легко оценивается масса части стального каната, соответствующая времени формирования этой строки. Плотность материала стальных проволок и физический размер пикселя в направлении сканирования являются известными, поэтому оценка площади сечения $S(x)$ по строке изображения, соответствующей координате x , сводится к интегрированию распределения $H(y)$

$$S(x) = \int_0^{y_0} H(y) dy \quad (3.15)$$

На рисунке 3.8 приведены результаты сопоставления радиографического изображения образца стального каната и соответствующей зависимости $S(x)$. На радиографическом изображении стального каната отчетливо выделяются два витка стальной проволоки, скрепляющей канат. Расплетенная часть каната имеет большую реальную площадь сечения проволок, чем основная часть каната. Указанный факт связан с большим усредненным углом между осями проволок и осью каната для его расплетенной части.



a



b

Рисунок – 3.8 Сопоставление $S(x)$ *a* и радиографического изображения стального каната *b*

Распределение $S(x)$ для образцовой части стального каната имеет ярко выраженную периодичность, что позволяет использовать положения максимумов и минимумов и их значения в качестве информативных параметров радиографических изображений стальных канатов.

Заключение по разделу. В разделе 3 разработан алгоритм выбора оптимальных максимальных энергий рентгеновского излучения по критерию минимума относительной погрешности эффективного диаметра каната. Приведены результаты решения оптимизационной задачи для диапазона изменения диаметров стальных канатов в интервале от 10 мм до 50 мм.

Экспериментально доказано наличие на радиографических изображениях стальных канатов периодических структур, характеристики которых могут быть использованы в качестве информативных параметров для оценки качества стальных канатов.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не только масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности научно–исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

4.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. Результатом разработки технологии является разработки методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса цифровой радиографии стальных канатов и алгоритмов классификации дефектов по их образам.

Сегмент рынка, в котором будут использоваться разработки систем цифровой радиографии, так же полученные алгоритмы обработки радиографических изображений стальных канатов и рекомендации можно использовать в учебных заведениях и аттестационных центрах по НК.

4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

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

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в таблице 4.1. Для этого необходимо отобрать не менее трех–четырех конкурентных товаров и разработок.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Из расчетов следует, что ресурсоэффективность технологии систем цифровой радиографии несколько выше, чем у остальных методов.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто–способность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0.1	5	3	4	0.5	0.3	0.4
2. Безопасность	0.04	5	5	5	0.2	0.2	0.2
3.Соответствие заявленным требованиям	0.04	5	5	4	0.2	0.2	0.16
4. Функциональность	0.02	5	4	4	0.1	0.08	0.08
5. Качество интеллектуального интерфейса	0,07	5	5	4	0,35	0,35	0,28
6.Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,05	5	5	3	0,25	0,25	0,15
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0.08	5	4	4	0.4	0.32	0.32
2. Уровень проникновения на рынок	0.1	4	5	4	0.4	0.5	0.4
3. Цена	0.2	5	4	3	1	0.8	0.6
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0.09	5	4	4	0.45	0.36	0.36
5. Финансирование научной разработки	0.07	5	4	3	0.35	0.28	0.21
6. Многократное использование ограниченных средств	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Обеспечение занятости	0,04	5	5	4	0,2	0,2	0,16
Итого	1	64	57	50	4.9	4.24	3,72

4.3 SWOT–анализ

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

Первый этап – заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Все результаты отображены в матрице SWOT (Таблица 4.2.).

Таблица 4.2 – Матрица SWOT

Сильные стороны научно–исследовательского проекта: С1. Систематизирование и классифицирование канатов и методы их обнаружения и идентификации С2. Исследование возможности применения цифровой радиографии для выявления основных типов дефектов стальных канатов С3. Разработка методики выбора энергии рентгеновского излучения применительно к цифровой радиографии стальных канатов С4. Разработка алгоритмов для оценки точности измерения эффективных диаметров стальных канатов С5. Возможность более долгого использования С7. Наличие бюджетного финансирования.	Слабые стороны научно–исследовательского проекта: Сл1. Системы перемещение канат очень дорогое Сл2. Затруднение с выбором источника излучение Сл3. Фокусное пятно чем ниже в источнике излучение, тем он дороже
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Повышение стоимости конкурентных разработок	Угрозы: У1. Развитая конкуренция технологий производства У2. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства

Второй этап – состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно–исследовательского проекта внешним условиям окружающей

среды. Это соответствие или несоответствие выявит степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа была построена интерактивная матрица проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Пример интерактивной матрицы проекта представлен в интерактивной матрице проекта.

Таблица 4.3 – Матрица «Сильные стороны–возможности»

Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	B1	+	+	–	–	–	–	+
	B2	–	–	–	–	+	–	–
	B3	+	+	+	+	+	+	–

Таблица 4.4 – Матрица «Слабые стороны–возможности»

Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	+	–	–
	B2	–	+	–
	B3	–	–	+

Таблица 4.5 – Матрица «Сильные стороны–угрозы»

Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	У1	+	+	+	+	+	+	+
	У2	0	0	–	–	+	–	+
	У3	+	+	–	–	0	–	–

Таблица 4.6 – Матрица «Слабые стороны–угрозы»

Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	+	+	+
	У2	+	+	–
	У3	+	–	+

После проведенного SWOT–анализа можно сделать вывод, что данная технология имеет преимущества по сравнению с имеющимися разработками: в разработки алгоритмов для оценки точности измерения эффективных диаметров стальных канатов. При реализации данного проекта могут возникнуть трудности из-за того, что системы перемещение канат очень дорогое а также в затруднении с выбором источника излучение.

4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для оценки готовности проекта заполняется форма (Приложение В), содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

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

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (4.2)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;
 B_i – балл по i -му показателю.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется суммарным количеством баллов. Таким образом, перспективность разработки и знания разработчика средние.

4.5 Инициация проекта

4.5.1 Цели и результат проекта

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.п. В таблице 4.7 приведена информация о заинтересованных сторонах проекта.

Таблица 4.7 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Российско–китайская научная лаборатория радиационного контроля и досмотра ИНК НИ ТПУ	Появление на рынке продукта, который соответствовать заявленным требованиям.
Руководитель Осипов С.П.	
Исполнитель Жумабекова Ш.Т.	

В таблице 4.8 представлена информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 4.8 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса цифровой радиографии стальных канатов и алгоритмов классификации дефектов по их образам
Ожидаемые результаты проекта:	Результаты выполненных исследований должны быть реализованы в алгоритмах выбора и оценки параметров и характеристик комплексов цифровой радиографии стальных канатов
Требования к результату проекта:	Экономическая обоснованность
	Разработать алгоритм для оценки точности измерения эффективных диаметров

4.5.2 Организационная структура проекта

На данном этапе работы решаются следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определена роль каждого участника в данном проекте, а также прописаны функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информация представлена в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час.
1	Осипов С.П.	Руководитель проекта	Координация деятельности участников проекта	400
2	Жумабекова Ш.Т.	Исполнитель по проекту	провести цикл экспериментальных работ по исследованию работоспособности алгоритмов	1100
ИТОГО:				1500

4.6. Планирование управления научно–техническим проектом

4.6.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рисунке 4.1 представлена иерархическая структура работ по проекту.

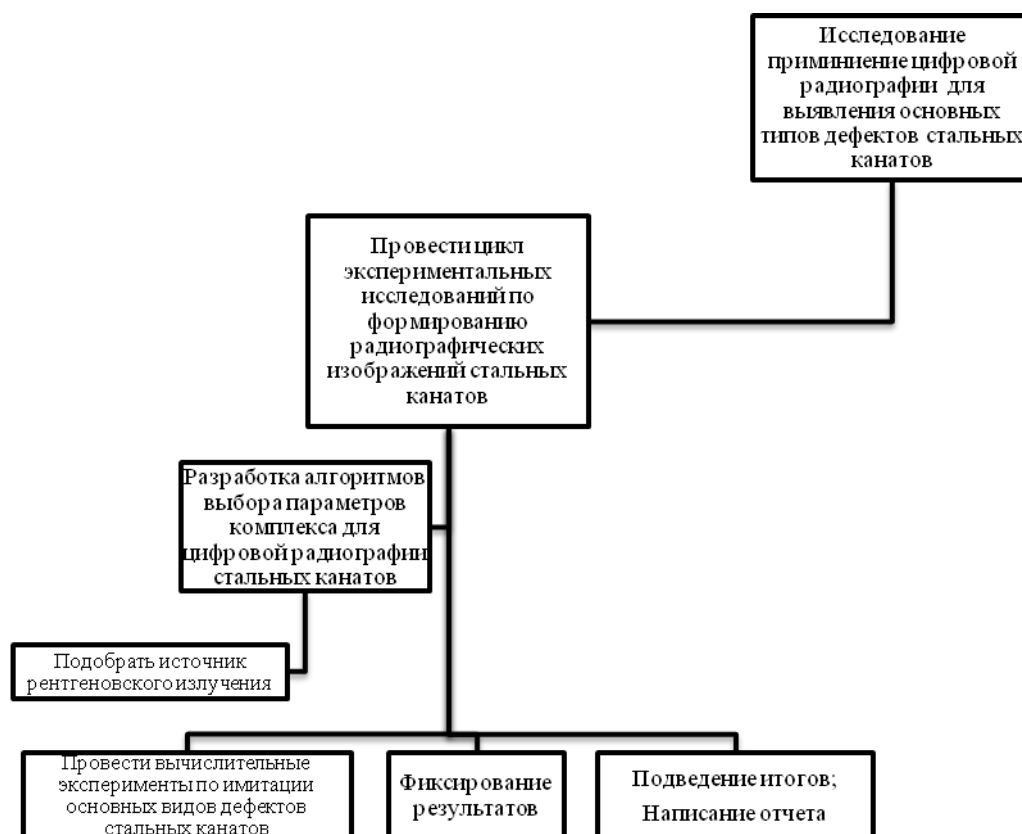


Рисунок 4.1 – Иерархическая структура проекта

4.6.2 Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Руководитель Осипов С.П.	Исполнитель Жумабекова Ш.Т.
1	2	3
Разработка и согласование технического задания	+	+
Изучение литературы		+
Исследование возможности применения цифровой радиографии для выявления дефектов стальных канатов		+
Сравнить результаты натурных и вычислительных экспериментов по формированию радиографических изображений стальных канатов		+

Продолжение таблицы 4.10

1	2	3
Разработка алгоритмов выбора параметров комплекса для цифровой радиографии стальных канатов	+	+
Подобрать параметры комплекса цифровой радиографии для стальных канатов большого диаметра	+	+
Подобрать линейку (панель) радиометрических детекторов		+
Подобрать источник рентгеновского излучения	+	+
Провести вычислительные эксперименты по имитации основных видов дефектов стальных канатов		+
Написание статей и отчетов	+	+
Оформление отчета.	+	+

Степень участия в проекте может характеризоваться следующим образом: Ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход. Исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение). Согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

4.6.3 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела были определены ключевые события проекта, их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эта информация сведена в таблицу (смотреть в таблице 4.11).

Таблица 4.11 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	2	3	4
1	Инициация проектом	16.09.15	Техническое задание, календарный план
2	Формирование требований к проекту	14.10.15	Литературный обзор, исходные данные к работе

Продолжение таблицы 4.11

3	Разработка	17.11.15	Разработка систем цифровой радиографии стальных канатов
4	Оформление результатов	15.05.16	Оформление отчета

4.6.4 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу сведена в таблицу (смотреть таблицу 4.12)

Таблица 4.12 – Реестр рисков

Название	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1–5)	Влияние риска (1–5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	2	3	4	5	6	7
Риск технологической «неадекватности»	Низкий уровень финансирования проекта	2	4	Низкий	Грамотная разработка методик выбора и оценки параметров комплекса цифровой радиографии стальных канатов	Отсутствие заказчиков
Риск финансовой «неадекватности»	Использование материалов низкого качества, остановка реализации проекта	1	3	Низкий	Точный расчет необходимых затрат	Неверный расчет бюджета проекта

1	2	3	4	5	6	
Риск неправильной оценки характеристик контрольных образцов	Время работы над проектом	2	5	Низкий	Персонал должен проходить периодическую переаттестацию	Низкий профессиональный уровень работающего персонала
Риск неуправляемости проектом	Низкий уровень качества разработанной технологии	3	5	Средний	Привлечение высококвалифицированного персонала	

4.6.5 План проекта

Для планирования выполнения ВКР необходимо составить календарный план проекта и построить линейный график проекта. Календарный план проекта представлен в таблице 4.13.

В данном пункте расчет продолжительность этапов работ будет осуществляться опытно–статистическим методом, который реализуется двумя способами:

- экспертный;
- аналоговый.

Экспертный способ предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию. Для определения вероятных (ожидаемых) значений продолжительности работ $t_{ож}$ применяется формула:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (4.3)$$

где t_{min} – минимальная продолжительность работы, дн.;

t_{max} – максимальная продолжительность работы, дн..

Для выполнения работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР);
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни.

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ОЖ}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}$$

где $t_{ОЖ}$ – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно $K_{ВН} = 1$;

$K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_{Д} = 1-1,2$; предположим, что $K_{Д}=1,2$.)

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{К} \cdot T_{РД}$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{К}$ – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, рассчитываемый по формуле

$$T_{К} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (4.4)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 366$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 52$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 10$).

На 2016 год коэффициент календарности равен:

$$T_{К} = \frac{366}{366 - 52 - 10} = 1,204$$

В таблице 4.13 приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе

Таблица 4.13 – Календарный план–график проведения исследования

№	Вид работ	Исполните ли	Т _к , кал, дн.	Продолжительность выполнения работ																	
				февраль			март				апрель				май				июнь		
				2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	
1	Разработка ТЗ	Р	7																		
2	Изучение и анализ литературы	М	15																		
3	Проведение консультаций	Р	7																		
4	Исследование возможности применения цифровой радиографии для выявления дефектов стальных канатов	М	7																		
5	Разработка алгоритмов выбора параметров комплекса	М	14																		
6	Подобрать параметры комплекса цифровой радиографии для стальных канатов большого диаметра	М	21																		
7	Подобрать источник рентгеновского излучения	М	7																		
8	Провести вычислительные эксперименты по имитации дефектов стальных канатов	М	21																		
9	Подготовка материалов для ВКР	М	10																		
10	Обсуждение результатов	Р	2																		
11	Оформление ВКР	М	9																		

4.7 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета разработки технологии изготовления контрольных образцов из неметаллов необходимо провести полную оценку всех расходов, необходимых для ее выполнения. Расходы группируются по следующим статьям:

1. расходы на сырье, материалы, покупные изделия;
2. расходы на специальное оборудование;
3. основная заработная плата;
4. дополнительная заработная плата;
5. отчисления в социальные фонды;
6. работы, выполняемые сторонними организациями;
7. накладные расходы.

4.7.1 Расчет затрат на сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

Проведем расчет затрат на сырье, материалы, покупные изделия. Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам. Материалы, необходимые для выполнения ВКР и их стоимость приведены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Сырье, материалы необходимые для выполнения ВКР

Наименование	Кол– во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Бумага для оргтехники (А4)	1 шт.	250	250
Канцелярские товары	1 шт.	80	80
USB Flash накопитель	1шт.	1400	1400
Всего за материалы			1730
Итого по статье C_m			1730

4.7.2 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}}$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

$Ц_{\text{э}} = 5,257$ руб./кВт·час (с НДС);

$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t$, где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, выбирается самостоятельно (возьмем равным 0,7). Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 15 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_c$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_c \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_c = 1$.

Таблица 4.15– Затраты на технологическую электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{об}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{об}}$, кВт	Затраты $C_{\text{эл.об.}}$, руб.
Персональный компьютер	392	0,3	651,22
Высокоэнергетический рентгеновский томограф	392	0,15	325,61
Итого:			1302,44

4.7.3 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того статья включает так называемые транспортно–заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли–продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 ÷ 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в указанных границах. Пример смотреть в таблице 4.16

Таблица 4.16 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол–во	Сумма, руб.
Рентгеновская трубка MXR–451HP/11	75000	1шт	75000
Итого:			75000

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны:

$$C_{\text{мат}} = 75000 * 1,05 = \mathbf{78750 \text{ руб.}}$$

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

Так как новое оборудование не покупалось, а использовалось уже принадлежащее ТПУ, стоимость оборудования учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Амортизационные отчисления рассчитываются по формуле:

$$З_{ам} = \frac{(Ц_i \cdot H_a)}{100\%}, \quad (4.5)$$

где $З_{ам}$ – ежемесячная сумма амортизационных отчислений;

$Ц_i$ – цена (балансовая стоимость) 1-го оборудования;

H_a – норма амортизационных отчислений (%), которая в соответствии с налоговым кодексом РФ определяется по следующей формуле:

$$H_a = \frac{1}{T_{п.и.}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

где $T_{п.и.}$ – срок полезного использования объекта (в днях) определяется в соответствии с Классификацией основных средств, включаемых в амортизационные группы.

Амортизационные отчисления рассчитаны в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Величина амортизационных отчислений

Наименование	Количество			Ст. первон., руб.			Т п.и., дни			На, % в мес			А в мес., руб.			А за период, руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Высоко–энергетический рентгеновский томограф	1	1	1	6200000	2000000	1500000	730			0,137			8494	2740	2055	33976	10960	8220
Всего																33976	10960	8220

4.7.5 Расчет основной заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Оклад инженера принимается равным окладу соответствующего специалиста низшей квалификации в организации, где исполнитель проходил преддипломную практику. При отсутствии такового берется оклад инженера собственной кафедры (лаборатории).

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/24,83 \quad (4.7)$$

$ЗП_{\text{дн-т}} = 28924,94/24,83 = 1164,92$ – среднетарифная ЗП научного руководителя

$ЗП_{\text{дн-т}} = 6595,7/24,83 = 265,64$ – среднетарифная ЗП инженер

учитывающей, что в году 294 рабочих дней и, следовательно, в месяце в среднем 24,83 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4.18. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 21. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:

$$K_{\text{ПР}} = 1,1; K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188; K_{\text{р}} = 1,3.$$

Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{и}} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699.$$

Таблица 4.18 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Коэффициент
НР	28924,94	1164,92	1,699
И	6595,7	265,64	1,699

Таблица 4.19 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	71	71
– выходные дни	51	51
– праздничные дни	20	20
Потери рабочего времени на отпуск	48	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	294

Исходя из количества рабочих, основная заработная плата составит для руководителя:

$$З_{\text{осн.р}} = 1164,92 \cdot 264 = 307538,88 \text{ руб.}$$

для исполнителя:

$$З_{\text{осн.и}} = 265,64 \cdot 393 = 104396,52 \text{ руб.}$$

Таблица 4.20 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	З _м , руб	З _{дн} , руб.	Т _р , раб.дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	28924,94	1164,92	264	307538,88
Исполнитель	6595,7	265,64	393	104396,52

4.7.6 Расчет дополнительной заработной платы

Дополнительная заработная плата научно–производственного персонала составляет в среднем 12% от суммы основной заработной платы.

Таким образом, дополнительная заработная плата:

для руководителя:

$$З_{д.р} = 307538,88 \cdot 0.12 = 36904,67 \text{руб}$$

для исполнителя:

$$З_{д.и} = 104396,52 \cdot 0.12 = 12527,58 \text{руб.}$$

Таблица 4.21 – Заработная плата исполнителей ВКР

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель
Основная зарплата	307538,88	104396,52
Дополнительная зарплата	36904,67	12527,58
Итого	344443,55	116924,1
Итого по статье $C_{зп}$	461367,65	

4.7.7 Расчет отчислений на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды включают в себя отчисления во внебюджетные фонды: пенсионный фонд, фонд ОМС и т.д. Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды составляет 30%, тогда

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) \quad (4.8)$$

$$C_{внеб} = 0,3 \cdot 344443,55 = 103333,1 \text{руб.}$$

4.7.8 Расчет накладных расходов

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную

тому. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. Накладные расходы составляют 80–100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Примем коэффициент накладных расходов $k_{\text{накл}}$ равным 90%,

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (4.9)$$

$$C_{\text{накл}} = 0,9 \cdot 344443,55 = 309999,2 \text{ руб.}$$

Группировка затрат по статьям приведена в таблице 4.22. Плановая себестоимость составила 962019.95 руб.

Таблица 4.22 – Группировка затрат по статьям

Статьи затрат	Стоимость, руб.
Материалы	1730
Специальное оборудование	78750
Заработная плата	461367,65
Отчисления на социальные нужды	103333,1
Оплата работ, выполняемых сторонними организациями	6840
Накладные расходы	309999,2
Итого плановая себестоимость	962019.95

Для реализации данной разработки потребуется 962019.95 рубля.

4.7.9 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

Оплата работ, выполняемых сторонними организациями, включает в себя:

- Услуги Internet 300р в месяц. За 22 месяца – 6600руб;

- Распечатка 110 стр. – 180 руб., переплет – 60 руб.

Суммарные расходы на оплату работ, выполняемых сторонними организациями: 6840 руб.

4.7.10 Оценка экономической выгоды проекта

С 80–х годов прошлого века ускоренными темпами развиваются различные реализации цифровой радиографии, отличающиеся высокой производительностью, высокой чувствительностью и возможностью применять различные алгоритмы обработки изображений. Появление высокочувствительных линеек (панелей) радиометрических детекторов, позволяющих формировать радиографические изображения, геометрическое разрешение которых приближается к классической радиографии, и расширение номенклатуры высокоэффективных источников рентгеновского излучения обуславливают применимость цифровой радиографии для неразрушающих испытаний стальных канатов большого диаметра.

Полученные в результате диссертационных исследований алгоритмы обработки радиографических изображений стальных канатов и рекомендации позволяют повысить вероятность обнаружения и правильной идентификации дефектов, а также выбрать максимальную энергию рентгеновского излучения по критерию минимальной погрешности оценки эффективного диаметра стального каната.

Заключение по разделу. По результатам выполненного задания для раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» было достигнуто следующее:

– Были определены потенциальные потребители результатов исследования;

– Проведен SWOT–анализ, по результатам которого можно сделать вывод, что данная технология имеет преимущества по сравнению с имеющимися разработками. Данная разработка и имеет низкую стоимость, по

сравнению с существующими технологиями. Для повышения спроса необходима активная рекламная компания;

– Определены цели и требования к результатам проекта. Целью является разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса цифровой радиографии стальных канатов и алгоритмов классификации дефектов по их образам. Результате исследований алгоритмы обработки радиографических изображений стальных канатов и рекомендации позволяют повысить вероятность обнаружения и правильной идентификации дефектов, а также выбрать максимальную энергию рентгеновского излучения по критерию минимальной погрешности оценки эффективного диаметра стального каната.

– Составлен план проекта, в соответствии с которым определяются объем работ и время, затрачиваемое на ее выполнение. Из календарного плана следует, что руководитель (Осипов С. П.) занят календарных 323 дня (264 рабочих дней), исполнитель ВКР (Жумабекова Ш.Т.) занят календарных 492 дня (393 рабочих дней);

– Рассчитан бюджет научного исследования. Рассчитано, что для реализации проекта требуется 962019.95 рубля;

– Проведена оценка экономической выгоды исследования.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Объектом исследований данной выпускной квалификационной работы является разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса цифровой радиографии стальных канатов и алгоритмов. Полученные в результате диссертационных исследований алгоритмы обработки радиографических изображений стальных канатов и рекомендации позволяют повысить вероятность обнаружения и правильной идентификации дефектов, а также выбрать максимальную энергию рентгеновского излучения по критерию минимальной погрешности оценки эффективного диаметра стального каната.

В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка MXR–451HP/11 (производства Comet AG, Швейцария) что позволяет получать радиационное излучение большого энергетического спектра и является опасным фактором при несоблюдении техники безопасности.

5.1 Производственная безопасность

При выполнении работы существует вероятность воздействия следующих производственных факторов: недостаточная освещенность, электрический ток, рентгеновское излучение, работа при высоких температурах, физические и эмоциональные перегрузки . 50

К физическим факторам можно отнести опасность поражения электрическим током, поскольку работать приходится с оборудованием, питающимся от сети –220В 50Гц, воздействие излучение монитора компьютера.

К психофизическим факторам можно отнести монотонность работы, умственное перенапряжение и т.п. При обработке полученных информации, лаборант выполняет монотонную работу, что может вызвать возникновение нервных расстройств или переутомляемость [51].

На производительность труда влияют следующие вредные производственные факторы:

- недостаточная освещенность рабочего места;
- пониженная или повышенная температура рабочей зоны;
- отклонение от нормативных значений влажности воздуха.

5.2 Анализ вредных и опасных факторов

5.2.1 Отклонение параметров микроклимата

Микроклимат является важной характеристикой производственных помещений. В организме человека происходит непрерывное выделение тепла. Одновременно с процессами выделения тепла происходит непрерывная теплоотдача в окружающую среду. Равновесие между выделением тепла и теплоотдачей регулируется процессами терморегуляции, т.е. способностью организма поддерживать постоянство теплообмена с сохранением постоянной температуры тела. Отдача тепла происходит различными видами: излучением, конвекцией, испарение влаги.

Нарушение теплового баланса в условиях высокой температуры может привести к перегреву тела, и как следствие к тепловым ударам с потерей сознания. В условиях низкой температуры воздуха возможно переохлаждение организма, могут возникнуть простудные болезни, радикулит, бронхит и другие заболевания.

К параметрам микроклимата относятся: температура воздуха, температура поверхностей, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха.

Согласно требованиям «СанПиН 2.2.4.548–96.[52] Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» оптимальные параметры микроклимата в лаборатории приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Оптимальные значения характеристик микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22–24	21–25	40–60	0,1
Тёплый	23–25	22–26	40–60	0,1

Для создания благоприятных условий труда и повышения производительности, необходимо поддерживать оптимальные параметры микроклимата производственных помещений. Для этого предусмотрены следующие средства: центральное отопление, вентиляция (искусственная и естественная), кондиционирование.

5.2.2 Недостатки освещения на рабочем месте

Свет является естественным условием жизни человека, необходимым для здоровья и высокой производительности труда, основанной на работе зрительного анализатора, самого тонкого и универсального органа чувств. Обеспечивая непосредственную связь организма с окружающим миром, свет является сигнальным раздражителем для органа зрения и организма в целом. Достаточное освещение действует тонизирующее, улучшает протекание основных процессов высшей нервной деятельности, стимулирует обменные и иммунобиологические процессы, оказывает влияние на формирование суточного ритма физиологических функций человека.

При проведении исследований должны применяться системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Выбор между равномерным и локализованным освещением проводится с учётом особенностей производственного процесса и размещения

технологического оборудования. Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Применение одного местного освещения на рабочих местах не допускается [53].

Основными нормируемыми показателями являются освещенность на рабочем месте, общий индекс цветопередачи, коэффициент пульсаций освещенности. Лаборатории общего назначения с использованием электронных устройств имеют следующие нормы: освещенность 400 лк по российским нормам (СП 52.13330.2011).

Коэффициент пульсации освещенности K_p – критерий оценки относительной глубины колебаний освещенности в результате изменения во времени светового потока газоразрядных ламп при питании их переменным током.

Постоянство освещенности во времени достигается стабилизацией питающего напряжения, жестким креплением светильников, применением специальных схем включения газоразрядных ламп [53]. Например, снижение коэффициента пульсации освещенности люминесцентных ламп с 55 до 5% (при трехфазном включении) приводит к уменьшению утомления и повышению производительности труда на 15% для работ высокой точности.

Величина освещенности должна быть постоянной во времени. Колебания освещенности, вызванные резким изменением напряжения в сети, имеют большую амплитуду, каждый раз вызывая переадаптацию глаза, приводят к значительному утомлению. Пульсация освещенности связана также с особенностью работы газоразрядных ламп.

5.2.3 Ионизирующее излучение

Ионизирующее излучение активно применяется во многих отраслях промышленности, медицине. Данный тип излучения используется в данной работе, создается он с помощью рентгеновской трубки в которой поток

электронов под напряжением «врезается» в мишень и в результате образуется, так называемое, тормозное излучение. Итак, воздействие излучение может быть внутренним или внешним и может происходить различными путями.

Список основных дозовых пределов облучения и допустимые уровни устанавливаются для следующих категорий облучаемых лиц:

- 1) персонала – лиц, работающих с техногенными источниками (группа А) или находящихся по условиям работы в сфере из воздействия (группа В);
- 2) населения, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности [54].

Для студентов и учащихся в возрасте до 21 года, проходящих обучение с использованием источников ионизирующего излучения, годовые накопленные дозы не должны превышать значений, установленных для лиц из населения.

Основные принципы обеспечения радиационной безопасности:

1. Уменьшение мощность источников до минимальных величин;
2. Сокращение времени работы с источниками;
3. Увеличение расстояния от источников до работающих;
4. Экранирование источников излучения материалами, поглощающими ионизирующее излучение.

Для коллективной и индивидуальной защиты от радиационного излучения во время эксперимента в лабораторную комнату запрещен вход всем лицам без исключения. Для информирования о проведение эксперимента включается световая сигнализация с частотой миганий один раз в секунду. Перед началом опыта необходимо убедиться в отсутствии лиц в лабораторной комнате и после этого закрыть дверь и начать эксперимент. Так как, используемый прибор контролируется лаборантом и пучок излучения узконаправлен, нет необходимость в средствах индивидуальной защиты. Главным условием обеспечения безопасности при эксперименте – отсутствие каких – либо лиц в лабораторной комнате.

Рентгеновская трубка становится источником ионизирующего излучения только после подачи на нее питающих напряжений. Поэтому с

ними вполне можно безопасно работать, если придерживаться некоторых правил.

- В обязательном порядке установка должна содержать защиту от неиспользуемого излучения.

- Столь же обязательно необходима защита от излучения рабочего пучка после прохождения им облучаемого объекта.

- Желательно иметь датчик излучения как на установке, так и при себе на случай различных ЧП

- Направлять излучение от себя.

- Сделать невозможным включение установки другими людьми.

Обеспечить хорошее охлаждение трубки, как того требуют ее характеристики, это избавит от опасности перегрева и связанных с ним проблем в виде разрушения колбы или анода трубки.

5.2.4Электрический ток

Поражение электрическим током возникает при соприкосновении с электрической цепью, в которой присутствуют источники напряжения и/или источники тока, способные вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела. Обычно чувствительным для человека является пропускание тока силой более 1 мА [55].

Одной из особенностей поражения электрическим током является отсутствие внешних признаков грозящих опасности, которые человек мог бы заблаговременно обнаружить с помощью органов чувств.

Ток приводит к серьезным повреждениям центральной нервной системы таких жизненно важных органов как сердце и легкие. Поэтому второй особенностью воздействия тока на человека является тяжесть поражения.

Третья особенность поражения человека электрическим током заключается в том, что токи промышленной частоты силой в 10–15мА способны вызвать резко интенсивные судороги мышц.

Окружающая среда (влажность и температура воздуха, наличие заземленных металлических конструкций и полов, токопроводящей пыли и др.) оказывает дополнительное влияние на условия электробезопасности. Степень поражения электрическим током во многом зависит от плотности и площади контакта человека с токоведущими частями.

По условиям электробезопасности установки, используемые при выполнении работы, относятся к категории установок, работающих с напряжением до 1000В. Устройства относятся к 1 классу, так как имеет рабочую изоляцию и место заземления [55].

Безопасность эксплуатации при нормальном режиме работы установок обеспечивается следующими защитными мерами:

- применение изоляции;
- недоступность токоведущих частей;
- применение малых напряжений;
- изоляция электрических частей от земли.

Поражение электрическим током возникает при соприкосновении с электрической цепью, в которой присутствуют источники напряжения и/или источники тока, способные вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела. Обычно чувствительным для человека является пропускание тока силой более 1 мА. Кроме того, на установках высокого напряжения возможен удар электрическим током без прикосновения к токоведущим элементам, в результате утечки тока или пробоя воздушного промежутка.

Сила поражения зависит от мощности разряда, от времени воздействия, от характера тока (постоянный или переменный), от состояния человека — влажности рук и т. п., а также от места соприкосновения и пути прохождения тока по организму.

1. К работе с электроустановками допускаются лица, имеющие третью либо четвертую группу допуска, устанавливаемые квалификационной комиссией.

2. Лица, не имеющие непосредственного отношения к обслуживанию электроустановок, к работе с ними не допускаются.

3. Все питающие части должны быть заземлены. Сопротивление заземления должно не превышать 40м.

4. Перекоммутацию кабелей, соединяющих периферийные устройства с ЭВМ, а также установку плат дополнительных устройств (модемов, портов ввода–вывода и т.д.) в слоты шины расширения компьютера необходимо осуществлять только при отключенном питании.

5. При замене (установке) плат расширения необходимо пользоваться браслетом заземления, либо перед осуществлением этой операции избавиться от накопленного на теле статического заряда посредством прикосновения к заземленной части компьютера, в противном случае возможно повреждение чувствительных к статике микроэлементов ЭВМ.

6. Для исключения поражения электрическим током запрещается: часто включать и выключать компьютер без необходимости, прикасаться к экрану и к тыльной стороне блоков компьютера, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании мокрыми руками, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании, имеющих нарушения целостности корпуса, нарушения изоляции проводов, неисправную индикацию включения питания, с признаками электрического напряжения на корпусе, класть на средства вычислительной техники и периферийном оборудовании посторонние предметы.

7. Запрещается под напряжением очищать от пыли и загрязнения электрооборудование.

8. Запрещается проверять работоспособность электрооборудования в непригодных для эксплуатации помещениях с токопроводящими полами, сырых, не позволяющих заземлить доступные металлические части.

9. Недопустимо под напряжением проводить ремонт средств вычислительной техники и периферийного оборудования. Ремонт

электроаппаратуры производится только специалистами–техниками с соблюдением необходимых технических требований.

10. Во избежание поражения электрическим током, при пользовании электроприборами нельзя касаться одновременно каких–либо трубопроводов, батарей отопления, металлических конструкций , соединенных с землей

11. При приближении грозы необходимо оперативно закончить работу на компьютере и отключить его от сети во избежание повреждения последовательного порта и исключения сбоев при возможных скачках напряжения в сети, характерных в подобных случаях.

Рабочее место должны удовлетворяться всем требованиям безопасности жизнедеятельности: отсутствие доступа к токоведущим частям, все источники питания должны быть пронумерованы, корпуса компьютеров заземлены.

5.3 Экологическая безопасность

Неразрушающий вид контроля является «без отходов», то есть, во время проведения контроля и после него, не имеется каких – либо побочных продуктов, которые подлежат утилизации (имеется в виду радиационный неразрушающий контроль). В результате выполнения разработки систем цифровой радиографии стальных канатов не существует источников загрязнения окружающей среды, единственная опасность такого контроля, как было сказано, ионизирующее излучение опасное для человека. Лабораторная комната, где располагается установка для промышленной томографии и радиографии , должна иметь закрывающуюся железную дверь и не иметь каких – либо нарушений целостности стен, дыр и т.д. Излучательный блок (ИБ) должен быть в полной комплектности и без нарушения целостности поверхности защитного кожуха и питающих проводов. ИБ обязан находится на подвижной платформе, данная платформа должна прочно находится на рабочем столе.

Для системы охлаждения подходит проточная холодная вода без использования специальных фильтров.

Образцы стальных канатов, которые были использованы в исследований многоразовые и в дальнейшем хранятся в лаборатории.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация во время эксперимента может возникнуть в двух случаях. В первом случае, если во время эксперимента в лабораторную комнату войдет человек, тогда для него существует опасность облучения рентгеновским излучением и получение дозы облучения. Для предотвращения данного инцидента следует обеспечить невозможность проникновения в лабораторную комнату людей во время эксперимента. Это обеспечивается закрытием двери лаборатории перед началом эксперимента и уведомлении всех сотрудников о техники безопасности.

Во втором случае, чрезвычайная ситуация может возникнуть во время эксперимента, если не включена система охлаждения излучательного блока. Для предотвращения данной опасности необходимо разработать датчик, который бы сигнализировал в комнате лаборанту о том, что система охлаждения не включена, работает в неправильном режиме или неисправна. Другим шагом для решения данной задачи является создание автономной охлаждающей системой с использованием масла, управление которой осуществлялось бы на управляющем блоке лаборанта.

5.4.1 Опасность возникновения пожара

В лаборатории повышен риск возникновения пожара. Неисправность электрооборудования, освещения, неправильная их эксплуатация, наличие статического электричества недостаточный контроль пожарных устройств и производственного оборудования может послужить причиной пожара. Пожар

на предприятии наносит большой материальный ущерб и часто сопровождается несчастными случаями с людьми.

Пожарная безопасность представляет собой комплекс мероприятий (организационных и технических) целью которых, является обеспечение безопасности населения, предупреждения пожара, ограничение его распространения. А так же, создание условий для осуществления успешного пожаротушения. Профилактика предотвращения пожара должна обеспечивать регулярные проверки пожарной сигнализации, первичных средств пожаротушения; проводиться инструктаж и тренировки по действиям в случае пожара; не загромождаться и не блокироваться эвакуационные выходы; выполняться требования правил технической эксплуатации и правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок; во всех служебных помещениях должен быть установлен «План эвакуации персонала при пожаре», определяющий порядок действия персонала во время возникновения очага возгорания и устанавливающий расположение средств пожаротушения [56].

Для предотвращения пожара в лабораторий должно быть оборудовано первичными средствами пожаротушения: углекислотным огнетушителем типа ОУ–2 или ОУ–5. Также помещение должно быть оснащено пожарной сигнализацией. Рекомендуются тип — система на основе оптических пожарных извещателей ДИП–3СУ и пульта Сигнал–20П SMD.C–2000. Рекомендуется также оборудовать помещение автоматической установкой объемного газового пожаротушения, например системой азотного пожаротушения «Гарсис».

5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Правила безопасности согласно "Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (оспорб–99/2010))» .

– Для приема пищи и курения должно предусматриваться специальное помещение, оборудованное умывальником для мытья рук с подводкой горячей воды.

– К непосредственной работе с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинские противопоказания.

– Женщины должны освобождаться от работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений на весь период беременности, а при работе с радиоактивными веществами в открытом виде и на весь период кормления ребенка. Для женщин репродуктивного возраста (до 40 лет) вводится дополнительное ограничение облучения: доза на область таза не должна превышать 1 бэр за любые 2 месяца (НРБ–99/2009), а для мужчин не выше 5 бэр в год. В лаборатории должен проводиться индивидуальный дозиметрический контроль с регистрацией полученной дозы в журнале.

– При изменении характера работ с источниками ионизирующих излучений, повышении класса работ и т.п. проводится внеочередной инструктаж и проверка знаний правил безопасности и личной гигиены.

– Лица, временно привлекаемые к работам с источниками ионизирующих излучений, должны быть проинструктированы перед началом работы.

– О всех нарушениях и отступлениях от нормального режима работы, несоответствии средств индивидуальной защиты и предъявляемым к ним требованиям сотрудники лаборатории обязаны докладывать ответственным лицам [57].

Рекомендуется располагать рабочий стол в центре лабораторной комнаты и направлять излучательный блок в то направление излучение, в котором вероятность появления людей минимальна. Другими словами, излучение должно быть направлено противоположно расположению входа в лабораторную комнату. В рабочей зоне обязательно наличие источников холодной воды и системы слива. На рабочем столе излучательный блок

располагается на широкой стороне стола (если он прямоугольный) и на противоположной стороне устанавливается матричный детектор. Комнату с блоками управления и компьютером необходимо выбирать таким образом, чтобы она не находилась за комнатой где располагается источник излучения. Лабораторная комната должна хорошо проветриваться и иметь необходимое освещение, как искусственное, так и естественное. Так как, все управление выполняется одним лаборантом, рекомендуется иметь подвижный офисный стул для минимизации физической нагрузки оператора. После двух часов работы рекомендуется перерыв на 20 – 30 минут для того, чтобы рентгеновская трубка полностью охладилась, это предотвратит преждевременный выход из строя нагреваемых элементов. Важно, чтобы лаборант был не уставшим и в бодром расположении духа. Рекомендуется во время перерыва физическая активность и отдых.

Заключение

В настоящей работе рассмотрены особенности формирования и анализа цифровых радиографических изображений стальных канатов. Изучено структура комплексов цифровой радиографии стальных канатов. Так же были исследованы формирование изображений в системах сканирующей цифровой радиографии стальных канатов. Объектом исследований является разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса цифровой радиографии стальных канатов и алгоритмов.

Для реализации указанной цели работы были решены следующие основные задачи:

- Систематизированы и классифицированы дефекты стальных канатов и методы их обнаружения и идентификации.
- Доказана возможность применения цифровой радиографии для выявления основных типов дефектов стальных канатов.
- Разработана методика выбора энергии рентгеновского излучения применительно к цифровой радиографии стальных канатов.
- Разработан алгоритм для оценки точности измерения эффективных диаметров стальных канатов.

В разделе 2 совокупность выражений (2.1)–(2.11) последовательно описывает особенности процесса формирования и анализа цифровых изображений стальных канатов, что позволяет использовать их для дальнейших исследований в области разработки алгоритмов обработки радиографических изображений, целью которых является повышение вероятности обнаружения дефектов стальных канатов и правильности их идентификации. Полученные результаты будут способствовать совершенствованию методов неразрушающего контроля стальных канатов на стадии их изготовления и в процессе эксплуатации с целью повышения долговечности и безопасности.

В разделе 3 разработан алгоритм выбора оптимальных максимальных энергий рентгеновского излучения по критерию минимума относительной

погрешности эффективного диаметра каната. Приведены результаты решения оптимизационной задачи для диапазона изменения диаметров стальных канатов в интервале от 10 мм до 50 мм. Экспериментально доказано наличие на радиографических изображениях стальных канатов периодических структур, характеристики которых могут быть использованы в качестве информативных параметров для оценки качества стальных канатов.

По результатам выполненного задания для раздела **«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»** было достигнуто следующее:

- Были определены потенциальные потребители результатов исследования;

- Проведен SWOT-анализ, по результатам которого можно сделать вывод, что данная технология имеет преимущества по сравнению с имеющимися разработками. Данная разработка и имеет низкую стоимость, по сравнению с существующими технологиями. Для повышения спроса необходима активная рекламная компания;

- Определены цели и требования к результатам проекта. Целью является разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса цифровой радиографии стальных канатов и алгоритмов классификации дефектов по их образам. Результате исследований алгоритмы обработки радиографических изображений стальных канатов и рекомендации позволяют повысить вероятность обнаружения и правильной идентификации дефектов, а также выбрать максимальную энергию рентгеновского излучения по критерию минимальной погрешности оценки эффективного диаметра стального каната.

- Составлен план проекта, в соответствии с которым определяются объем работ и время, затрачиваемое на ее выполнение. Из календарного плана следует, что руководитель (Осипов С. П.) занят календарных 323 дня (264 рабочих дней), исполнитель ВКР (Жумабекова Ш.Т.) занят календарных 492 дня (393 рабочих дней);

– Рассчитан бюджет научного исследования. Рассчитано, что для реализации проекта требуется 962019.95 рубля;

– Проведена оценка экономической выгоды исследования.

В разделе **«Социальная ответственность»** магистерской работы описали рабочее место, провели анализ выявленных вредных и опасных проявлений факторов производственной среды, затронули вопросы охраны окружающей среды, рассмотрели защиту при возникновении чрезвычайных ситуаций, правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, а также организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

На основании вышеизложенного можно заключить, что работа выполнена в полном объеме, цель достигнута. Результаты данной работы являются значимыми для организации. Разработанная по результатам исследования документация рассмотрена и одобрена руководством и находится на стадии внедрения в процессы организации.

Список использованных источников

1. ГОСТ 3241–91 Канаты стальные технические условия.
2. ГОСТ 3241–91 Канат двойной свивки.
3. Гост 18899–73 Канаты стальные. Канаты закрытые несущие. Технические условий.
4. Гост 3071–88 Канат двойной свивки.
5. ГОСТ 7372–79 Проволока стальная канатная. Технические условия.
6. Мироненко А.С. Неразрушающий контроль стальных канатов / А.С. Мироненко, И.И. Шпаков // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2006. – № 5 – С. 52—54.
7. Сухоруков Д.В. Неразрушающий контроль и диагностика состояния стальных канатов / Д.В. Сухоруков // Проблемы и решения. – 2007. – № 3 – С. 63–64.
8. Волоховский В.Ю. Магнитный дефектоскоп как основной инструмент при комплексном обследовании днищ и стенок стальных вертикальных резервуаров / В.Ю. Волоховский, О.П.Потехин // Химическая техника. – 2016. – №4 – С. 20–25.
9. Сухоруков В.В. Стандартизация технологий неразрушающего контроля стальных канатов: Состояние и проблемы / В.В.Сухоруков // Территория NDT. – 2014. – №4 – С. 26–27.
10. Белицкий С. Неразрушающий контроль стальных канатов магнитными дефектоскопами: документирование и интерпретация результатов / С. Белицкий, В.Сухоруков // В мире неразрушающего контроля. – 2006. – № 2 – С. 21–23.
11. Гузенко В.Л. Опыт применения магнитной дефектоскопии стальных канатов подъемных сооружений Космодрома Байконур / В.Л. Гузенко, А.В. Полупан, А.В. Онопченко // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 7 – С. 21–24.

12. Ильин А.М. Дефектоскопия стальных канатов шахтных подъемов / А.М. Ильин, В.Н. Антипов, М.Н. Богданов, В.М. Голубчиков // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – № 2 – С. 37–40.
13. Котельников В.С. Значение дефектоскопии канатов для повышения безопасности эксплуатации грузоподъемных кранов / В.С. Котельников, В.Г. Жуков, А.А. Худошин, В.В. Сухоруков // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 9 – С. 15–25.
14. Сухоруков В.В. Стандартизация технологий неразрушающего контроля стальных канатов: Состояние и проблемы / В.В.Сухоруков // Территория NDT.–2014. –№4 – С. 26–27.
15. Осипов С.П. Идентификация дефектов стальных канатов по цифровым радиографическим изображениям / А.Б. Батрагин , В.С. Воронова, А.В. Шиндина // Технологии техносферной безопасности (Интернет–журнал). – 2013. – № 5. – С.10.
16. Мироненко А.С. Неразрушающий контроль стальных канатов пассажирских канатных дорог. / А.С. Мироненко, И.И. Шпаков // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2006. – № 4. – С.52–54.
17. Zhang D., Zhao M., Zhou Z., Pan S. Characterization of wire rope defects with gray level co–occurrence matrix of magnetic flux leakage images // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2013. – Vol. 32. – No. 1. – pp. 37–43.
18. Krešák J., Kropuch S., Peterka P. The anchors of steel wire ropes, testing methods and their results // Metalurgija–Zagreb. – 2012. – Vol. 51. – No. 4. – pp. 485– 488.
19. Hua–Ming L., Yi–Mei M. Fatigue testing and evaluation for coated stell belts based on electrical method // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – Vol. 49. – No. 10. – pp. 602–609.
20. Liu H.P., Miao C.Y., Li X.G. An algorithm based on PFT for defect recognition of X–ray steel rope cord conveyer belt image // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 722. – pp. 572–575.

21. Xian-Guo L., Chang-Yun M., Wen W., Yan Z. Fault automatic detection method for steel cord conveyor belt based on the regularity analysis // International Journal of Digital Content Technology and its Applications. 2012. – Vol. 6. – No. 1. – pp. 226–234.
22. Ewert U., Bavendiek K., Robbins J., Zscherpel U., Bueno C., Gordon T., Mishra D. New compensation principles for enhanced image quality in industrial radiology with digital detector arrays // Materials Evaluation. – 2010. – Vol. 68. – No. 2. – pp. 163–168.
23. Ewert U., Zscherpel U., Heyne K., Jechow M., Bavendiek K. Image quality in digital industrial radiography // Materials Evaluation. – 2012. – Vol. 70. – No. 8. – pp. 955–964.
24. Осипов С.П., Батранин А.В., Воронова В.С., Шиндина А.В. Идентификация дефектов стальных канатов по цифровым радиографическим изображениям // Технологии техносферной безопасности (Интернет-журнал). – 2013. – № 5. – 10 с.
25. Dai Y., Miao C., Rong F. Design of dual energy x-ray detector for conveyor belt with steel wire ropes // International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009. – International Society for Optics and Photonics, 2009. – p. 738528.
26. Осипов С.П. , Темник А.К. , Воронова В.С. Неразрушающий контроль стальных канатов методом дуальных энергий (Интернет-журнал) // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 4(44). – 10 с.
27. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П. Щелевые и пинхольные коллиматоры в цифровой рентгенографии // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 3. – С. 62–64.
28. Недавний О.И., Осипов С.П. Аппроксимация зависимостей интегрального и дифференциального коэффициента ослабления тормозного излучения от толщины поглощающего фильтра // Дефектоскопия. – 1994. – № 9 – С. 92–95.

29. Chen F., Wong P.J.Y. On periodic discrete spline interpolation: Quintic and biquintic cases // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2014. – Vol. 255. – pp. 282–296.

30. Pease B.J., Scheffler G.A., Janssen H. Monitoring moisture movements in building materials using X-ray attenuation: Influence of beam-hardening of polychromatic X-ray photon beams // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 36. – pp. 419–429.

31. Osipov S.P., Klimenov V.A., Osipov O.S., Samigullin V.D., Shtein A.M. Mass determination algorithms using high energy digital radiography // *Advanced Materials Research, XI International Conference on Prospects of Fundamental Sciences Development (PFSD–2014)*, April 22–25, 2014, Tomsk, Russia. – 2015. – Vol. 1085. – pp. 455–459.

28. Фандеев В.П., Самохина К.С. Формирование пористой структуры поверхности материала межпозвонкового диска лазерной обработкой // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – №3. – С. 148–152.

29. Гончаров А.К., Козейчук В.А., Нарышкин Д.А. Опыт наблюдений за строительством высотных зданий / / *Строительные материалы*. – 2009. – № 5. – С. 65—67.

30. Осипов, С.П., Подшивалов, И.И., Осипов О.С., Алибекова, А.А., Чесноков, Д.В. Способ оценки площади оптической неоднородности на основе анализа цифровых изображений // *Вестник ТГАСУ*. – 2015. – № 3. – С. 103–112.

31. Садеков, Р.Н. Определение дальности до объекта на основе анализа его изображений / Р.Н. Садеков // *Известия института инженерной физики*. – 2010. – Т. 2. – № 16. – С. 65–67.

32. Sukhorukov V., Sukhorukov D., Slesarev D., Mironenko A. Nondestructive testing of bridge stay cables // *Proceedings of the NDE–NDT for Highways and Bridges: Structural Materials Technology Conference*. 2012. P. 347–352.

33. Yun H.B., Kim S.H., Wu L., Lee J.J. Development of inspection robots for bridge cables //The Scientific World Journal. – 2013. – 17 p.
34. Basak D. Non-destructive evaluation of drive ropes: a case study // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2005. –No. 4. – P. 221–229.
35. Carriatore V., Canova A., Vallan A., Vusini B. Experience and technologies in NDT of ropes //Key Engineering Materials. – 2007. – Vol. 347. – P. 627–632.
36. Sukhorukov V.V., Slesarev D.A., Vorontsov A.N. Electromagnetic inspection and diagnostics of steel ropes: technology, effectiveness and problems // Materials Evaluation. – 2014. – Vol. 72. – No. 8. – P. 1019–1027.
37. Krešák J., Peterka P., Kropuch S., Novák L. Measurement of tight in steel ropes by a mean of thermovision // Measurement. – 2014. – Vol. 50. – P. 93–98.
38. Casey N.F., Holford K.M., Taylor J.L. The acoustic evaluation of wire ropes immersed in water // NDT International. – 1987. – Vol. 20. – No. 3. – P. 173–176.
39. Peng P.C., Wang C.Y. Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges // NDT & E International. – 2015. – Vol. 75. – P. 80–86.
40. Осипов С.П., Батрагин А.В., Воронова В.С., Шиндина А.В. Идентификация дефектов стальных канатов по цифровым радиографическим изображениям // Технологии техносферной безопасности (Интернет-журнал). – 2013. – № 5. – С.10 .
41. Канаты стальные. Сортамент. Москва: Изд-во стандартов, 2012. – 9 с.
42. Недавний О.И., Осипов С.П. Аппроксимация зависимостей интегрального и дифференциального коэффициента ослабления тормозного излучения от толщины поглощающего фильтра // Дефектоскопия. – 1994. –№ 9. – С. 92–95.

43. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Shtein A.M., Strugovtsev D.V. About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering / RTEP2014. Tomsk –2015. Vol. 81. No. paper 012082. 13 p.

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

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

46. Imamura R., Mikami K., Minami Y., Kanno I., Ohtaka M., Hashimoto M., Ara K., Onabe H. Unfolding method with X-ray path length-dependant response functions for computed tomography using x-ray energy information // Journal of nuclear science and technology. – 2010. Vol. 47. – No. 11. – P. 1075–1082.

47. Осипов С.П., Клименов В.А., Батрагин А.В., Штейн А.М., Прищепа И.А. Применение цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии при исследовании строительных конструкций и в строительном материаловедении // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 6. – С. 116–127.

48. Osipov S.P., Klimenov V.A., Osipov O.S., Samigullin V.D., Shtein A.M. Mass determination algorithms using high energy digital radiography // Advanced Materials Research. – 2015. Vol. 1085. – P. 455–459.

49. Ключев В.В. Рентгентехника / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, В.М. Аертс .: Машиностроение, 1992. – 1 480 с.

50. Дубовцев В.А. Безопасность жизнедеятельности. / Учеб. пособие для дипломников.: изд. КирПИ, 1992. –32 с.

51. Безопасность жизнедеятельности: Учебник/Под ред. проф. Э.А. Арустамова. – 10–е изд., перераб. и доп. – М.: Издательско–торговая корпорация «Дашков и К», 2006. –476 с

52. СанПиН 2.2.4.548 – 96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещениях» от 1 октября 1996г. №21

53. СНиП 23 – 05 –95*. Нормы проектирования. Естественное и искусственное освещение. М.: Минстрой России, 2011.

54. ГОСТ Р 22.11.03–2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Безопасность жизнедеятельности населения на радиоактивно загрязненных территориях.

55. ГОСТ Р МЭК 61140–2000. Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи

56. Взрывчатые вещества и взрывные работы Том 1 / Сухаревский М.Я. – М.; Государственное техническое издательство, 1923 – 911 с.

57. СП 2.6.1.2612–10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). – М.; Стандартинформ , 2010. – 62 с

Приложение А

Раздел магистерской диссертации, выполненный на иностранном языке

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Жумабекова Шынар Талгаткызы		

Консультант кафедры иностранных языков физико–технического института

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры иностранных языков	Устюжанина Анна Константиновна	кандидат филологических наук		

Консультант кафедры физических методов и приборов контроля качества

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
вед.научн.сотр., лаборатории №40 ИНК ТПУ	Осипов Сергей Павлович	Кандидат технических наук		

1 Literature review and rationale for research tasks

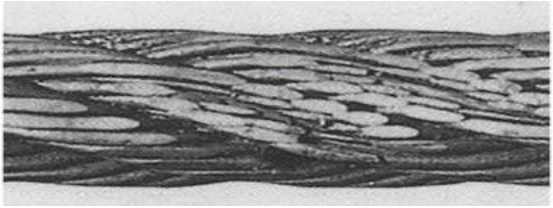
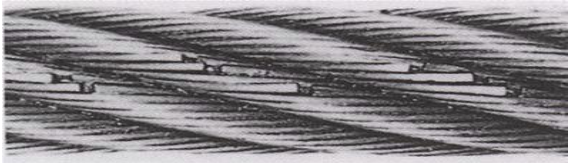
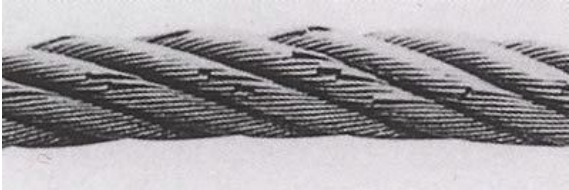
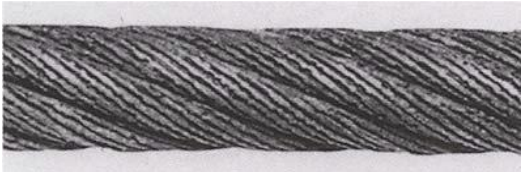
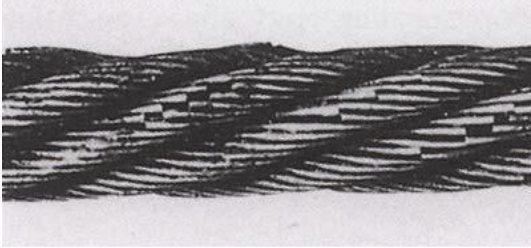
1.1 steel wire rope defects

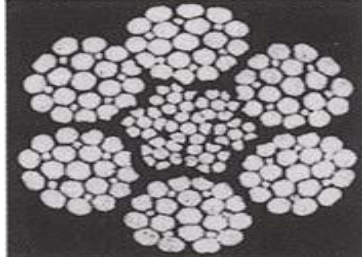
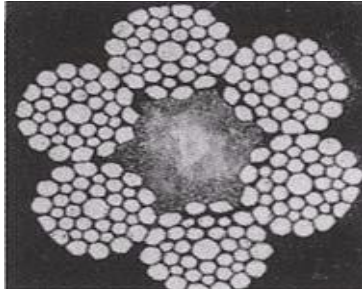
In order to improve the durability and reliability of wire ropes it is important to eliminate the possibility of falling from blocks and drums, the displacement of fixed size and grinding due to the contact with the structural elements or other cables.

The installation of reflective covers to wire ropes of lifting machines, which transport the molten metal, is necessary to protect them from direct exposure to heat and spatter. The premature wear of the ropes and their damage can occur due to improper selection of the rope structure, type and wrong direction of lay of the winding on the drum, the wrong choice of diameter ratio of rope and drum or block, profile and the size of the block of the stream and drum grooves, overloads, excessive dynamic effects on cable, abrasion and corrosion.

During the storage and usage wire ropes are coated with a protective lubricant in order to avoid rope wear and damage. The rope lubricants 39u and Torsiol 35 are mostly used as a lubricant material, and Torsiol 55 is used for the ropes of highly responsible mechanisms. These types of lubricants have good adhesion and during the operation they cannot be removed. Furthermore, they penetrate to the center of wire rope and its strands and have the ability to cover their surface with a thin film and solidify rapidly. These lubricants also do not evaporate and harden over time and they do not contain alkalis, acids and other elements which cause corrosion.

As mentioned above about the rope performance, when the wire rope is selected and applied in an adequate way, i.e., when the rope structure and its size, the breaking strength of the wires, diameters of ropes and pulleys, the radius of pulley gutters and other structural characteristics of the lifting machine are chosen properly, two determining factors occur: corrosion and mechanical wear. Depending on the operating conditions one of these factors is decisive for the removal of the rope out of service. The main types of wear and corrosion are presented in the table below.

Steel wire rope defects	Appearance
The localized wear due to the abrasion on the support structure.	
A narrow strip of wear leading to fatigue failure caused by the work in too large trenches or on too small support rollers.	
Two parallel strips of dangling wires indicating a bend while driving on very narrow trough pulley	
Strong rope wear of sided stranding caused by abrasion	
Strong rope wear connected with high pressure bearing	
Heavy corrosion	
Typical broken wires due to fatigue in bending.	

Wire breaks at the points of the conjugation of strands or strands with a core	
Internal corrosion, while the outer surface has little signs of destruction	
Significant wear and strong internal corrosion	

1.2 Control Methods of steel wire ropes

At the present time optical–visual, magnetic, ultrasonic and other methods of non–destructive testing are used to detect rope manufacture and production defects. Optical–visual methods help to distinguish surface defects of steel wire ropes (broken wires, corrosion damage). Magnetic and ultrasonic methods also allow identifying these defects in the surface layer of the rope.

The visual inspection of wire rope is made by "mittens" way. This method is widely used on all types of lifting equipment. However, the objectivity of rope state assessment (the number of broken wires) is very low and does not meet the requirements of full monitoring of wire rope condition during the work of lifting equipment. Since this method only determines broken wires formed and allocated on the rope surface, it is impossible to assess the state of internal wires.

Electromagnetic (magnetic), ultrasonic defectoscopes are applied for non–destructive control of steel wire ropes. The defectoscope of steel wire ropes DSC–UX

is used to detect broken wires and count their number over the entire length and at step of lay. The principle of its operation is based on the use of stray of magnetic fields generated from broken wires at the longitudinal magnetization of the rope. The total magnetic flux is measured by Hall sensor, or other sensors suitable for measuring the absolute value of the magnetic flux or change in flux. However, defectoscopes of this type is not widely available due to the difficulty of establishing the actual broken wires during the corrosion inside the rope.

The control methods of technical condition of the hoisting rope are based on determining the difference of parameters of converter devices IISK–4 and IISK–5 installed on the control segment of the rope and then on the controlled rope. Theoretical and experimental researches on improving the method of instrumental control over the state of the hoisting ropes are carried out under the leadership of the head. Candidate laboratory. tehn. Science VI Berezhinskogo in McNeil(Russia). The application of designed devices of IISK series provides sufficient accuracy in measuring thinning of the rope section and allows defining the destruction of steel or its zinc coating. At the same time ferromagnetic mass (shootings, brake cables, etc.) located at a distance less than 0.5 m from the controlled rope affect readings. A significant disadvantage of these devices is the increased wear rate of bronze shoes of the transmitter, and the presence of the couplings with small nuts complicates the installation of the converter and its preparation for work. Devices of IISK Series have a low maximum speed of rope control (up to 0.5 m / s), complex setup and calibration, considerable weight and dimensions of the converter. Therefore, it is necessary to find innovative solutions to create control devices of rope wear.

The device of magnetic defectoscope of steel wire ropes INTROS has a high ability to detect broken wears due to the use of microcomputer technique. The decoding of defectogram should be carried out by qualified and experienced professionals; however, this does not exclude errors due to subjectivity of the assessment. The speed of rope movement is 1 – 2 m / s. The accuracy of the detection of discontinuities is within 6 diameters of the rope. This device does not detect places of defects in the form of swelling of the rope wires.

For testing large-diameter ropes it is possible to use the classic X-ray, the lack of which is the use of X-ray film, which does not allow promptly stating a conclusion of the technical condition of steel ropes. The cost of such work is quite high, as expensive consumables are used. However, X-ray defectoscope is the most versatile method of identifying defects; it can detect almost all types of defects of steel wire ropes of different designs and diameters. One of the implementations of the X-ray defectoscope is a digital scanning radiography.

Digital radiography is more advanced and more convenient in various aspects of alternative conventional radiography in industrial non-destructive testing. The technology of radiography itself implies some disadvantages and limitations caused by the use of X-ray films.

The application of the film means its single use, it also often means low productivity, considerable inconvenience in film development snapshot, small dynamic range of the film, difficulties in the organization of the storage of the film and finished images, energy costs. In addition, the traditional industrial radiography means a constant flow of chemicals which are often expensive and unsafe from an environmental point of view.

The advantage of digital radiography, which makes this technology one of the most progressive in the field of non-destructive testing, is being able to completely dispense with the use of conventional x-ray film.

2 Generation and Analysis of Wire Rope Digital Radiographic Images.

Steel wire ropes are widely used in municipal engineering, construction, and industry. The safety and reliability of carrying and lifting machines and other equipment depend on the quality and technical conditions of wire ropes while in operation. Presently, the requirements for the safety and reliability levels of carrying and lifting machines are being restricted, especially for lifts and elevators. These requirements are impossible to provide without non-destructive testing (NDT) techniques used in wire rope manufacturing and operating process. Steel wire ropes

refer to a stranded wire products which are subjected to significant loads during their manufacture that results in the formation of diverse defects. It is steel wire ropes that are subjected to degradation while in operation since they are tractive force elements of carrying and lifting machines and work under unfavorable conditions. Negative effects such as mechanical stress, corrosion, wear, etc. lead to the formation of defects in wire ropes and considerable degradation of their technical conditions and, thereby, the probability of failures and accidents. Failures and accidents can lead to unforeseen cost expenditures and even human losses. For the last few decades, non-destructive testing techniques have been rapidly developed, including those applied for wire ropes. NDT techniques used for detecting manufacturing and operational defects of wire ropes include various optical, magnetic, ultrasonic, electrical, and other methods [17–19]. Such surface defects as, for example, broken wire, corrosion, wear are rather effectively detected by optical and visual methods. Some of these defects are located inside a wire rope and can be found out only by magnetic and ultrasonic non-destructive testing. Wire ropes with large diameter are the most complicated test objects for NDT testing. Such objects can be tested by classical radiography which has a number of disadvantages, namely: the use of argentine-containing radiographic films that results in a high cost of testing and the extremely low performance due to the multi-stage and long-term formation of shadow images. These disadvantages narrowed the application field of classical radiography down to solving problems of examination of accidents resulting in significant damages or human losses. Since the 80s of the past century, the different implementations of digital radiography have been rapidly developed [20–27] that are characterized by high performance, sensitivity, and the possibility of applying various algorithms of image processing. Radiometric detectors provide the generation of radiographic images having the geometrical resolution close to classical radiography. And a wider classification of high-performance X-ray sources stipulate for the use of radiography in NDT of wire ropes possessing large diameters [28–30]. Information found in the literature does not allow to adequately describe the process of generation and

processing digital radiographic images accounting for the properties of wire ropes with large diameters.

This paper is aimed at the discussion of the problem of the formation and processing radiographic images of wire ropes.

2.1 Structures of the digital radiographic system.

The digital radiographic image of a wire rope is generated by its scanning with a narrow X-ray beam produced by a slit collimator. Two scanning variants are possible. The first implies the wire rope movement relative to an X-ray generator–detector static system. In the second variant, this system moves relative to a wire rope in a static condition. The first variant is more preferable for wire rope in-process and in-service testing, at the possibility of the rope winding. The second variant has no alternative at wire rope static location that is typical for some of the bridge structures.

Wire rope scanning can be carried out by two ways: discrete and continuous. In discrete scanning, the mutual movement of the test object and the X-ray generator–detector static system is performed by fixed steps Δl . In continuous scanning, the line is formed during the time interval Δt . In terms of the quality of final images, these scanning methods are equivalent. The parameters of discrete and continuous scanning relate to each other as $\Delta l = V\Delta t$, where V is the velocity of the wire rope movement relative to the X-ray generator. In practical implementation, continuous scanning is preferred due to its higher performance: no time intervals of rope movements.

The diversity of digital radiographic systems is supplemented by two types of X-ray sources, such as pulsed and continuous wave. Usually, pulsed X-ray sources are more powerful. In a number of cases, their application can be restricted due to the time t of the scanning line formation that cannot be less than $1/\nu$, where ν is the X-ray pulse frequency. Moreover, pulsed X-ray sources can be of fixed and variable maximum energy radiation.

Radiographic image formation using pulsed X-ray sources can be performed solely by the integration method of radiation recording, while in a continuous X-ray source, both the integration and counting methods are possible. The counting method includes different implementations, namely: counting method proper; time; spectral.

The digital radiographic system intended for wire rope radiography incorporates a biological protection unit for individuals exposed to ionizing radiation. Dimensions and weights of this unit are defined by the power of X-ray generators, maximum X-ray energy radiation, and its distance from workplaces of the personnel.

As is known, X-ray radiation scattered and detected in the test object and other objects around substantially decreases the quality of non-destructive testing. This negative effect is traditionally reduced by X-ray source collimators and the detector array. Both slit and pinhole collimators can be used [31]. It is advisable to embed the collimator in the biological protection unit so as to reduce the weight of the digital radiographic system.

Another factor which complicates the analysis of radiographic images is X-ray beam hardening due to the increase of the test object thickness. This complicating factor can be compensated by two ways. The first is based on the stability of the test object material and implies compensation by the preliminary results of calibration measurements. The second is based on the spectral implementation of the counting method of radiation recording. Let us consider the layout geometry of scanning.

2.2 Layout geometry of scanning a wire rope

Figure 2.1 presents the cross-sectional view of the digital radiographic system and continuous scanning with a narrow X-ray beam similar to that one described in the work of Osipov *et al.* [30].

Steel wire ropes may have various structures however general principles of the radiographic image formation are eternal. A trait common to these test objects is their thickness which is measured in photon mean free path and changed from zero at the periphery to a certain maximum at the center. This fact determines the parameters selected for the digital radiographic system. Hence, the test object, namely the wire

rope, can be represented by a steel cylinder with radius R . For convenience, let us assume that all line-scan detectors are oriented towards the X-ray source.

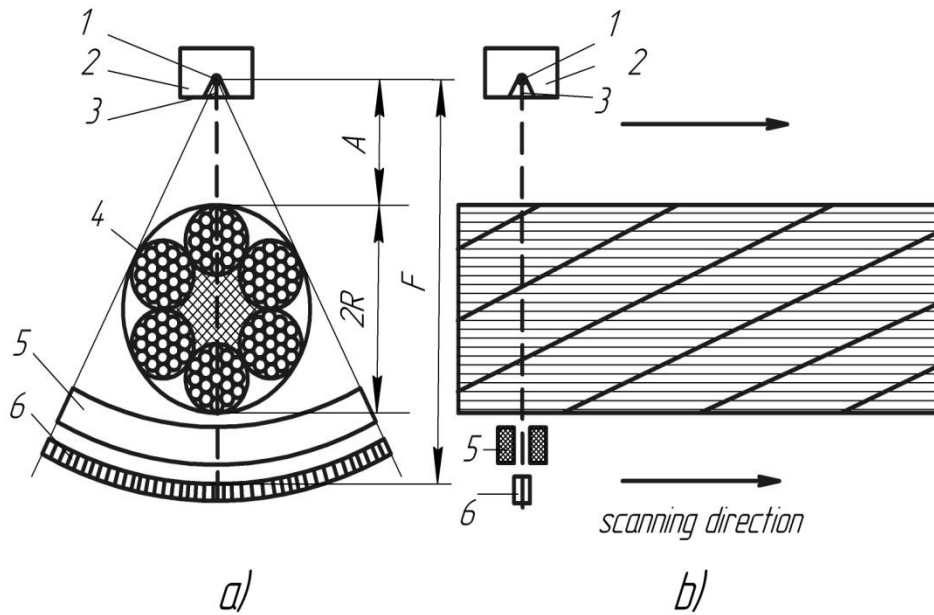


Figure 2.1 – Cross-sectional view of digital radiographic system: **(a)** normal to the scanning direction; **(b)** in the scanning direction.

1 – X-ray source; 2 – biological protection unit; 3 – embedded slit collimator; 4 – test object; 5 – slit collimator; 6 – detector array

Single radiometric detectors in the array have the cross-sectional dimension of $a \times a$ and are located at distance F from the X-ray source. The additional properties of the digital radiographic system are the minimum distance A from the X-ray source to the test object and the arc length l which touches frontal surfaces of detectors.

The original digital image I is $N \times M$ size matrix, where N is the number of pixels in length and $N = l/\Delta l = l/(V\Delta t)$; M is the number of detectors in the array. For definiteness, let us assume that $M \ll N$. In case the detectors adhere to each other, the geometrical parameter l can be obtained from the approximation formula

$$l \approx Ma \quad (2.1)$$

In radiographic systems based on pulsed X-ray sources, M is selected with a glance to the necessity for the use of end detectors in the capacity of reference channels intended for calibration. The inequality for M is as follows:

$$M > \text{int}\left(\frac{2F}{a} \arcsin \frac{R}{R+A} + 0.5\right) + 2k + 2, \quad (2.2)$$

where R is the radius of the rope; k is the number of end detectors in the array that excludes the hypothetical shadowing of line-scan detectors by the test object. This shadowing can be caused by fluctuations of the wire rope relative to the system of X-ray source–line-scan detector.

The next chapter describes stages of the formation and analysis of radiographic data obtained for the wire rope.

2.2 Generation of digital radiographic images.

Let us assume that detector m , $m=1 \dots M$ has two parameters, namely k_m and σ_m , i.e. the amplification coefficient and the inherent noise level, respectively. The wire rope is scanned by a narrow radiation beam produced by a slit collimator with the maximum energy E_{max} . The X-ray source is not isotropic. Therefore, it is necessary to reduce the influence of individual detector properties on the quality of final images. This can be achieved by both black and white calibration. Black calibration is reduced to the detection of average levels of inherent dark noises produced by detectors with their subsequent subtraction from informative signals. White calibration implies that black-calibrated informative signal received behind the test object is normalized by a black-calibrated signal without the test object.

Thus, in order to compose digital radiographic images, three types of measurement must be carried out. Black calibration measurements are carried out at switched off X-ray source I_b , whilst white calibration measurements are carried out at switched on X-ray source I_w and without a test object. The original image I is formed with the test object. The number of lines N_b and N_w in images I_b and I_w is significantly lower than N .

By means of the analog-to-digital coder, a set of analog signals (images) $\mathbf{I}_b, \mathbf{I}_w, \mathbf{I}$ transforms to a set of digital signals (images) $\mathbf{J}_b, \mathbf{J}_w, \mathbf{J}$. This process is described by equations

$$J_{nm} = \left[\frac{I_{nm}}{\Delta I} \right], n = 1 \div N, m = 1 \div M; J_{bnm} = \left[\frac{I_{bnm}}{\Delta I} \right], n = 1 \div N_b; J_{wnm} = \left[\frac{I_{wnm}}{\Delta I} \right], n = 1 \div N_w, (2.3)$$

where $[x]$ is the integral part of x value; ΔI is the quantization interval. The quantization interval ΔI is connected to the capacity k of the analog-to-digital coder $\Delta I = I_{lim}/2^k$, where I_{lim} is the maximum possible level of signals received from radiometric detectors. In case of pulsed X-ray sources, images $\mathbf{J}_w, \mathbf{J}$ are additionally normalized by the signal from the reference channel.

At the next stage, a digital radiographic image $\mathbf{Y}$ is composed from $\mathbf{J}_b, \mathbf{J}_w, \mathbf{J}$ images:

$$Y_{nm} = -\ln \frac{J_{nm} - \sigma_m}{J_{0m} - \sigma_m}, \sigma_m = \frac{\sum_{n=1}^{N_b} J_{bnm}}{N_b}, J_{0m} = \frac{\sum_{n=1}^{N_w} J_{wnm}}{N_w}. (2.4)$$

The final digital image $\mathbf{Y}$ can be analyzed by an operator or a specialized algorithm oriented to the detection, identification, and estimation of the defect impact degree. In the first case, the image $\mathbf{Y}$ is transformed to a digital gray-scale picture $\mathbf{Y}_{GS}$

$$Y_{GS\ nm} = M_{hl} \frac{Y_{nm} - S_b}{S_w - S_b}, (2.5)$$

where S_b, S_w are respectively black and white levels in $\mathbf{Y}$ image; M_{hl} is the number of halftones or gray gradations. The approach, when $S_b = \min_{n,m} Y_{nm}$, $S_w = \max_{n,m} Y_{nm}$ at $m=1 \dots M$; $n=1 \dots N$, seems to be more expedient. A modification of this approach may result in the reduction of the information content of the image. The use of other black and white levels can be caused, for example, by the adaptation to a certain operator.

The halftone image $\mathbf{Y}_{GS}$ is analyzed to detect defects and estimate their validity.

Presently, a wide range of wire rope types are used that are differ from each other not only by their diameter but also the structure. The image obtained by the X-ray computed tomography is presented in Figure 2 which illustrates the arrangement of strands in wire rope having the diameter of 25 mm.

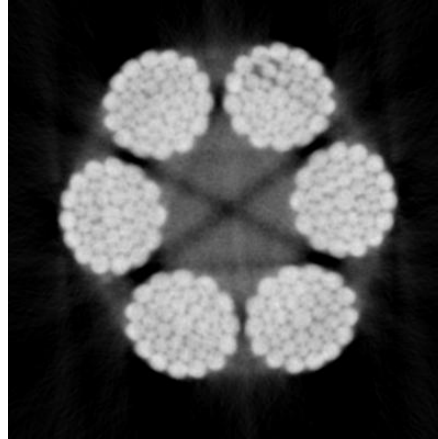


Figure 2.2 – CT-scan image of the wire rope

The image analysis of wire rope CT-scans is difficult for an operator due to a heterogeneous distribution of intensity in the image. Heterogeneous distribution of intensity results in the difference between the possibilities of the defect detection in the central and peripheral parts of the rope. These difficulties can be eliminated by the use of specialized algorithms calculated for processing the radiographic images as described, for example. [28]

A series of radiographic images was obtained for various maximum X-ray radiation energies. A typical digital radiographic image of the wire rope with the internal structure shown in Figure 3.2 is presented in Figure 3.3

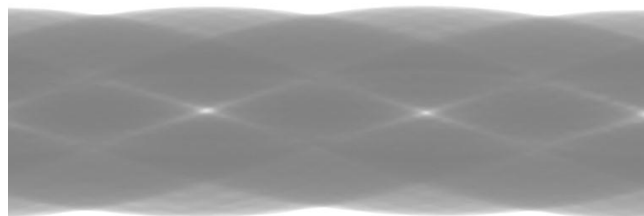


Figure 2.3 – A typical digital radiographic image of wire rope

The experiment was carried out on the industrial tomographic equipment designed at Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. X – rays were produced

by the MXR-451HP/11 X-ray tube assembly from Comet AG (Switzerland). Continuous-wave X-ray tube has 0.4 mm diameter focal spot; 450 kV nominal tube voltage; and 500 W continuous rating. The PerkinElmer XRD 1622 Flat Panel X-ray Detector (USA) was used in this experiment. This flat panel is a single substrate amorphous silicon active TFT/diode array having 200 μm pitch pixel matrix and direct deposition CsI:Tl fluorescent screen scintillator and intended for the industrial use in the high energy radiation field. The best results of CT-scan and radiographic imaging (Fig. 2.2 and 2.3) were obtained at 200 keV radiation energy with the use of filter consisting of a 2 mm thickness sheet of copper and 2.2 projection magnification. Apparently, this sort of space resolution is insufficient for the radiographic analysis of wire rope images carried out by a human operator. As mentioned above, the situation can be considerably improved by the application of various algorithms of image processing [28, 30].

It was stated above that a number of physical and engineering factors has a negative effect on such important properties of imaging as contrast and resolution. First of all, it is the X-ray beam hardening due to the increase of the test object thickness; photon scattering inside the test object; quantization of primary radiometric signals, etc. The negative effect produced by some of these factors can be reduced by the introduction of additional engineering elements in the digital radiographic system. Thus, to reduce the scattering effect, X-ray source collimators and/or the detector array can be used. Other factors are eliminated by the selection of the appropriate parameters. For example, the capacity selected appropriately for the analog-to-digital coder reduces the quantization effect. Some other negative factors can be reduced by an algorithmic method based on the specific testing. Here belong, for example, the X-ray beam hardening.

2.4 X-ray beam hardening correction algorithm

The traditional equation for the radiometric signal I and the thickness ρH (g/cm^2) of the attenuation material is as follows [32]:

$$I/I_0 = e^{-m_{ef}(E_{max}, \rho H)\rho H}, \quad (2.6)$$

where $m_{ef}(E_{max}, \rho H)$ is the mass attenuation coefficient of photons having energy E_{max} ; I_0 is the radiometric signal without a test object.

It is obvious that X-ray beam hardening correction algorithm is reduced to the estimation of ρH parameter. The following main methods are used to calculate the correction algorithm: graphic, inverse functions, analytical approximations, and dual energy X-ray imaging.

$$m_{ef}(E_{max}, \rho H)\rho H = -\ln(I/I_0) = Y = F(\rho H). \quad (2.7)$$

The graphic method includes the construction of the function $F(\rho H)$ graph by the results of experimental research or mathematical simulation. The function $F(\rho H)$ graph is constructed for the fixed scanning geometry and pre-set E_{max} value. ρH is X -axis and F is Y -axis. The intersection point of the line is $Y=Y_1$, where Y_1 is the measured signal, and the curve $F(\rho H)$ is just the target value of the thickness ρH that corresponds to Y_1 signal. It is clear that the graphic method is not very accurate and efficient.

The function $F(\rho H)$ is continuously differentiable increasing function. Therefore, the method of inverse functions is the alternative to the previous method. The thickness ρH can be obtained from

$$\rho H = F^{-1}(Y), \quad (2.8)$$

where F^{-1} is the inverse function. Let us show one of the possible methods of inverse functions applied to the described problem in calibration measurements. Let parameter ρH takes values of $\rho H_1, \rho H_2, \dots, \rho H_n$ which correspond to signal values of $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$. In case the measuring signal takes Y value, the value of ρH_i can serve as a crude estimate of ρH target value for which the deviation of $|Y_k - Y|$ at $k=1..n$ is minimum. The more accurate ρH measurement can be provided by the linear interpolation

$$\rho H \approx \rho H_i + \frac{(Y - Y_i)(\rho H_{i+1} - \rho H_i)}{Y_{i+1} - Y_i}. \quad (2.9)$$

In case the value n is large and calibration thicknesses $\rho H_1, \rho H_2, \dots, \rho H_n$ are close to each other, ρH value obtained from equation (9) can be rather exact. Also, it will be more exact if measured by spline interpolation as described by Chen *et al.* [13], the function F^{-1} being interpolated. Spline interpolation factors $a_i, b_i, c_i, d_i, i=1 \dots n$ are at stages of calibration measurements.

The analytical approach is close to the implementation of the inverse function method and based on the description of $Y(\rho H)$ function:

$$Y(\rho H) = \left(\frac{A}{1 + B\rho H + C(\rho H)^2} + 1 \right) D\rho H, \quad (2.10)$$

where A, B, C, D are approximation coefficients depending on $E_{\max}$, effective atomic number of the attenuation material Z , the detector sensitive volume, etc. Equation (10) is the approximation refinement as described in works [32, 34]. Coefficients A, B, C, D are ascertained at a stage of calibration. In the course of the formation and transformation of the radiographic image for each of its point, equation (10) can be solved with its left side measured relative to the known ρH value. In order to rapidly solve solutions similar to (10), the abovementioned method of inverse functions can be used.

First of all, the dual-energy X-ray imaging is intended for the correction of X-ray beam hardening. In terms of wire rope applications, this method is considered in detail in works of Dai *et al.* [29] and Osipov *et al.* [30]. During scanning, two radiographic images are formed for two maximum energies selected especially for the X-ray radiation. As a result of the combined processing of the original images, two dual-energy X-ray images are composed, namely **A** and **B**, that do not practically depend on the maximum X-ray radiation energies. The first image is presented by ρH parameter of the inspected test object, while the second is additionally sensitive to the effective atomic number Z .

A method of correction of the factor under analysis is chosen by the rope diameter and the requirements for the detection and identification of its defects as

well as their validity. The dual–energy X–ray imaging is the most universal method in this case.

Image $\mathbf{Y}^*$ formed at the algorithm output can be obtained from

$$\mathbf{Y}^* = \{\rho H_{nm}^*; m = 1...M; n = 1...N\}. \quad (2.11)$$

Further, it is image $\mathbf{Y}^*$ that is subjected to processing with a view to detect defects of the channels, and carry out their identification, and rationale for validity. The next chapter is devoted to the statements for the analysis of digital radiographic images of wire ropes.

2.5 The analysis of digital radiographic images of wire ropes.

Osipov *et al.* [28, 30] suggested the approach to the analysis of digital radiographic image algorithms based on the closeness of certain parameters of all unit cross–sections of the reference wire rope or its sections with the length equaling to the lay. Let these parameters be invariants of the wire rope, and in relation to radiographic images – invariants of radiographic images of wire ropes. The approach suggested in [28, 30] is then considered in detail. Each strand before being laid can be get in a circular cylinder. At the rude approximation, the wire rope model can be considered as a product comprising wires twisted in the identical strands. In these terms, the image of one section of the reference rope is produced from images of any other sections by the axial rope rotation to a strictly determined angle. This angle depends on the lay strand and angle, the distance between sections, rope and strand diameters, and the rope structure. The structure of wire rope strands complicates the understanding of the generation and analysis of radiographic images. Let us give several preliminary apparent notes connected to certain invariants of radiographic images based on Figure 2.3.

Note 1. There is a symmetric axis of the wire rope shadow image.

The presence a symmetric axis generates the existence of a range of invariants of digital radiographic images of wire ropes. Let us introduce the coordinate system OXY in the wire rope image. Axis OX is the symmetric axis of the shadow rope

image. Let us introduce $f_1(x)$ and $f_2(x)$ functions that restrict the wire rope image at the top and at the bottom. Thus, Note 2 can be stated to introduce $f_1(x)$ and $f_2(x)$ functions.

Note 2. Functions $f_1(x)$ and $f_2(x)$ are periodical and connected by $f_1(x) = -f_2(x)$ relation.

Invariants defined by $f_1(x)$ and $f_2(x)$ functions include: maximum transverse size D_{max} of the rope shadow in image; minimum transverse size D_{min} of the rope shadow in image; distance L between locations of the adjacent maxima and minima of these functions.

Strand boundaries are rather clearly seen in Figure 2.3. The additional invariants are connected with this fact and the significant difference between the maximum brightness of image fragments Y_F . For example, the distance L_w between the white spot centers located on the axis of the shadow image can be chosen as invariant.

One more note is connected with the stability of a certain mass property of the wire rope. It is obvious that the rope sections of the similar length have the similar weight. Let us reformulate this note in terms of the analysis of the final radiographic image of the wire rope.

Note 3. The weight W of the wire rope section limited by the X-ray radiation beam, stays practically unchanged during the formation of the unit line of the final radiographic image.

Let W be the mass of the rope cross-section. The analysis of classical radiographic images or one of the final dual energy X-ray images (eq. 34) allows the accurate measurement of the rope cross-section [35].

The digital radiography provides the solution of such problems as determination of different defects; measurement of defect sizes both in the scanning direction and the direction normal to it; identification of defects. Identification refers a defect to one or another type. In the work of Osipov *et al.* [28], the approaches to the defect identification of wire ropes are considered, namely: broken wire, wear, squashing, local increase of wire rope diameter, corrosion. These approaches are

based on the defect formation. Apparently, the identification of certain defect types can be directly connected with the analysis of deviations from reference values (index *nor*, see Table 1) of radiographic image invariants.

CONCLUSION

Equations (2.1) – (2.11) sequentially describe distinctive properties of generation and analysis of digital radiographic images of wire ropes allowing to use them for further research that concerns calculations of the image processing algorithm and wire rope proper identification. Results obtained will foster the improvement of NDT techniques in relation to wire rope in-process and in-service testing and the increase of their safety and durability.

Table 2.1 – Invariants of radiographic images and main types of defects

Main invariants	Defects	Defect visualization
Gradual change of brightness in image fragments	Broken wire	White spot on the background, $Y_F > Y_{nor}$
Maximum transverse size of the rope shadow in the image	Squashing	$D_{max} > D_{nor}$ or $D_{max} < D_{nor}$, but $W \approx W_{nor}$
Mass of the rope cross-section	Wear	$W < W_{nor}$
Maximum transverse size of the rope shadow in the image	Local increase of wire rope diameter	$D_{max} > D_{nor}$, $W \approx W_{nor}$, brightness of the central part is close to the reference, brightness difference increase in image fragments
Maximum transverse size of the rope shadow in the image	Internal corrosion of wire rope	$D_{max} > D_{nor}$, $W \approx W_{nor}$, different brightness in image fragments. Dual energy X-ray imaging is recommended
Maximum transverse size of the rope shadow in the image	Local diameter reduction due to a fiber core	$D_{max} < D_{nor}$, $W \approx W_{nor}$
Image symmetry	Wire rope rupture	Asymmetric distortion or formation of darker areas in the image. Several camera angles are recommended
Maximum transverse size of the rope shadow in the image	Foreign inclusions	$D_{max} > D_{nor}$ и $W > W_{nor}$
Brightness of image fragments	Separate strand or wire pushing out	$D_{max} > D_{nor}$. Several camera angles are recommended
Distance between centres of white spots located on the axis of the shadow image	Wire rope extension	$L_w > L_{w\,nor}$ и $L > L_{nor}$, $\Sigma W = \Sigma W_{nor}$