

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

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка систем цифровой радиографии резцов для горных и дорожных машин

620.179.152:621.9.025

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Журавский Евгений Евгеньевич		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Данков А.Г.	к.и.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Г.В.	к.т.н.		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения

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

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

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
Р7	Разрабатывать и внедрять энерго- и ресурсоэффективные технологические процессы производства приборных систем с использованием высокотехнологичных средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-8, ПК-10. ПК-11, ПК-12, ПК-14, ПК-21), CDIO Syllabus (1.3, 4.1, 4.2, 4.5. 4.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса, 19.032 Специалист по диагностике газотранспортного оборудования)

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение
 Уровень образования Магистратура
 Отделение контроля и диагностики
 Период выполнения: (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма предоставления работы:

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ – ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом работы:	
------------------------------	--

Дата контроля	Название раздела(модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
03.02.2018	Литературный обзор по теме	15
20.02.2018	Подготовка оборудования к проведению экспериментов.	10
12.03.2018	Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения, подготовка материалов к проведению экспериментов.	11
23.03.2018	Проведение экспериментальных исследований	17
12.04.2018	Анализ результатов экспериментов	20
20.04.2018	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	12
27.04.2018	Социальная ответственность	9
14.05.2018	Заключение	6

Составил преподаватель:

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Г.В.	к.т.н.		

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение
 Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) _____ (Дата) Вавилова Г.В.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ6А	Журавскому Евгению Евгеньевичу

Тема работы:

Разработка систем цифровой радиографии резцов для горных и дорожных машин	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	10267/с 30.11.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Детекторная матрица Perkin Elmer XRD 1621AN/CN . Рентгеновский аппарат РАП-225. Резцы для горных и дорожных машин.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых радиографических изображений. Типовые дефекты горных и дорожных машин. 2. Финансовый менеджмент, ресурсо-эффективность и ресурсосбережение. 3. Социальная ответственность 4. Заключение и выводы
Перечень графического материала	1. Презентация, выполненная в MS PowerPoint

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультанты
1. Литературный обзор; 2. Материалы и методы исследования; 3. Экспериментальная часть; 4. Заключение.	Осипов Сергей Павлович
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	Данков Артем Георгиевич

6. Социальная ответственность.	Анищенко Юлия Владимировна
Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Математическая модель системы цифровой радиографии	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Журавский Евгений Евгеньевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ6А	Журавскому Евгению Евгеньевичу

Школа	ИШНКБ	Отделение школы	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

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

<p>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</p> <p>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</p> <p>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</p>	<p>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; наблюдение.</p>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</p>	<p>1. Структура работ в рамках научного исследования</p> <p>2. Определение трудоемкости выполнения работ</p> <p>3. Выполнение SWOT– анализа проекта.</p> <p>4. Оценка готовности проекта к коммерциализации.</p>
<p>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</p>	<p>1. Разработка графика проведения научного исследования</p> <p>2. Расчет бюджета научно-технического исследования (НТИ)</p>
<p>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</p>	<p>1. Оценка сравнительной эффективности разработки</p>

Перечень графического материала:

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Альтернативы проведения НИ
3. График проведения и бюджет НИ
4. 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
Доцент ОСГН	Данков А.Г.	К.И.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Журавский Е.Е.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ6А	Журавскому Евгению Евгеньевичу

Школа	ИШНКБ	Отделение школы	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор алгоритм, методика, рабочая зона) и область его применения	Резцы горных и дорожных машин. Детекторная матрица Perkin Elmer XRD 1621AN/CN , применяется при контроле качества сварных и паяных соединений, литья, элементов продукции машиностроения и приборостроения в системах цифровой радиографии.
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1 Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.	При оценке условий труда должно учитываться воздействие следующих опасных и вредных факторов: – повышенный уровень ионизирующего излучения; – опасный уровень напряжений в электрических цепях, замыкание которых может пройти через тело человека;
2. Экологическая безопасность:	Утилизация оборудования. Воздействие ионизирующего излучения на окружающую среду.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: пожар.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Организация и соблюдение требований радиационной безопасности в помещении.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Анищенко Ю.В.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Журавский Евгений Евгеньевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 128 с., 7 рис., 28 табл., 56 источников, 4 приложения.

Ключевые слова: радиография, рентгеновский аппарат, цифровая радиография, дефектоскопия, резцы горных и дорожных машин.

Объект исследования: закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых радиографических изображений. Типовые дефекты горных и дорожных машин.

Предмет исследования: методы цифровой радиографии резцов горных и дорожных машин.

Практическая новизна: на данный момент отсутствует какая-либо система неразрушающего контроля резцов горных и дорожных машин, позволяющая повысить эксплуатационную безопасность и надежность эксплуатируемых в промышленности резцов.

В процессе исследования проводилась экспериментальная проверка методики оценки характеристик систем ЦР. Также проводилась радиография резцов горных и дорожных машин

На защиту выносятся:

- Математическая модель цифровой радиографии.
- Эффективность применения цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии применительно к контролю вращающихся и неподвижных резцов горных и дорожных машин

Содержание

Список сокращений и обозначений.....	13
Введение.....	15
1. Резцы для горных и строительно-дорожных машин.....	20
1.1 Поворотные резцы.....	20
1.2 Неподвижные резцы.....	23
1.3 Дефекты резцов.....	24
1.4 Неразрушающие методы контроля резцов горных и строительно- дорожных машин.....	25
1.5 Тенденции в развитии радиационных методов неразрушающих испытаний, контроля и диагностики.....	26
2. Математическая модель системы цифровой радиографии.....	31
2.1 Особенности регистраторов рентгеновского излучения для систем цифровой радиографии.....	32
2.2 Формирование цифровых радиографических изображений.....	35
2.3 Характеристики комплексов цифровой радиографии.....	40
2.3.1 Интегральная эффективность регистрации.....	41
2.3.2 Кратность ослабления рентгеновского излучения и радиационная прозрачность объекта контроля.....	43
2.3.3 Толщина объекта контроля в длинах свободного пробега.....	44
2.3.4 Интегральный и дифференциальный массовые коэффициенты ослабления рентгеновского излучения.....	46
2.3.5 Относительный сигнал.....	48
2.3.6 Относительный уровень шумов.....	50
2.3.7 Отношение сигнал/шум.....	51
2.3.8 Оценка пространственного разрешения в цифровой радиографии...	53
3. Расчёт косвенных и прямых характеристик систем цифровой радиографии резцов для горных и дорожных машин.....	56
3.1 Предварительные сведения.....	56
3.2 Расчёт косвенных параметров систем цифровой радиографии.....	57
3.3 Расчёт прямых характеристик систем цифровой радиографии.....	60
4. Экспериментальная проверка методики оценки характеристик систем цифровой радиографии.....	63
4.1 Общие замечания и сводка формул для экспериментальной оценки характеристик.....	63
4.2 Результаты экспериментов.....	64
5. Цифровая радиография резцов: эксперименты и выводы.....	67
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	71
6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и	71

ресурсосбережения	
6.3. Планирование научно-исследовательских работ	78
6.3.1. Структура работ в рамках научного исследования	78
6.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ	79
6.3.3. Разработка графика проведения научного исследования	80
6.4. Бюджет научно-технического исследования	83
6.4.1. Расчет материальных затрат НИИ	83
6.4.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	84
6.4.3. Основная заработная плата исполнителей темы	85
6.4.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	88
6.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	89
6.5. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	90
7. Профессиональная социальная ответственность.	93
7.2 Экологическая безопасность	97
7.3.Безопасность в чрезвычайных ситуациях	97
7.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	98
Заключение	99
Список использованной литературы	100
Приложения	106

Список сокращений и обозначений

- ЦР – цифровая радиография
- РВТ – рентгеновская вычислительная томография
- ОК – объект контроля
- ИРИ – источник рентгеновского излучения
- РРИ – регистратор рентгеновского излучения
- РОП – радиационно-оптический преобразователь
- РЧП – радиационно-чувствительный преобразователь
- ПР – пространственное разрешение
- ЭР – эффективность регистрации
- РК – радиационный контраст
- ФП – фотопреобразователь
- ППД – полупроводниковые детекторы
- АЦП – аналогово-цифровой преобразователь
- ОСШ – отношение сигнал/шум
- ПК – производительность контроля
- МКО – массовый коэффициент ослабления излучения
- ЛКО – линейный коэффициент ослабления излучения
- ГМ – горные машины
- СДМ – строительно-дорожные машины
- РО – рабочий орган
- ВР – вращающиеся резцы
- НР – неподвижные резцы
- ИСВ – износостойкая вставка
- НРБ – нормы радиационной безопасности
- ДСП – длина свободного пробега

Обозначения

E_{\max} – максимальная энергия рентгеновского излучения, кэВ

E – энергия рентгеновского фотона

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

F – фокусное расстояние

k_X – радиационный контраст

SNR – отношение сигнал/шум

ρ – плотность материала

H – толщина материала

Z – атомный номер материала

Z_{eff} – эффективный атомный номер материала

ρH – массовая толщина ОК

m – МКО материала ОК

r_X – пространственное разрешение

h_d – толщина РОП

μ_d – ЛКО излучения материалом РОП

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

Введение

Настоящий период развития человечества характеризуется двумя разнонаправленными векторами. Первый из векторов связан с ограниченностью земных ресурсов: энергии; полезных ископаемых; воды; территории. Ограниченность земных ресурсов требует эффективного их использования. Большая часть ресурсов используется конечным потребителем не в исходном виде, а конечном виде, который максимально соответствует потребительским запросам. Исходные ресурсы трансформируются в технические объекты и услуги. Эффективность использования природных ресурсов, не в последнюю очередь, определяется надёжностью производимых технических объектов. Здесь под надёжностью объектов понимается безотказность, долговечность, ремонтпригодность и способность к хранению. Всю совокупность технических объектов делят на одноразовые объекты и объекты длительного использования. Второй вектор обусловлен спецификой капиталистического производства, которая заключается в главной цели – увеличении капитала. Процесс увеличения капитала невозможен без поддержания на заданном уровне или роста прибыли в единицу времени. Разнонаправленность векторов развития проявляется, прежде всего, для объектов длительного использования. Противоречие заключается в том, что современные достижения в области материаловедения, конструирования технических систем, систем управления, контроля и диагностики позволяют производить технические объекты длительного использования, обладающие высокими уровнями всех составляющих надёжности, но это приводит к понижению спроса на упомянутые объекты, и, следовательно, к уменьшению производства и прибыли. Сглаживанием описанного противоречия должны заниматься не только правительства отдельных государств, но и мирового сообщества в целом. В ряде случаев конечный потребитель технических объектов вынужден диктовать свои условия производителю. Это связано с условиями и ограничениями на эксплуатацию технических объектов. К отраслям,

представители которых выдвигают жёсткие потребительские требования к техническим объектам и их элементам, относятся, например, горнодобывающая промышленность и транспортное строительство. Здесь транспортное строительство включает в себя, например, строительство и ремонт автомобильных дорог, а также строительство туннелей. В процессе ремонта автомобильных дорог, строительства туннелей и разработке горных пород происходит разрушение искусственных или каменных материалов. Для эффективного разрушения каменных материалов используются дорожные и горные машины с многоэлементными фрезерными рабочими органами. В качестве режущих элементов используются вращающиеся (поворотные) резцы и зубки. Долговечность рабочего органа дорожных фрез и горных машин, помимо прочности разрушаемых пород, конструкции резцов, формы и материала режущей части и геометрии резания зависит от качества изготовления единичного резца, а также от степени однородности резцов в рабочем органе. Под степенью однородности резцов понимается уровень их близости по основным параметрам. В процессе эксплуатации параметры резцов естественным образом изменяются. Представляется очевидным вывод о том, что долговечность рабочих органов, при прочих равных условиях, тем выше, чем ближе степень однородности резцов при их деградации в процессе эксплуатации. Этот вывод основан на традиционном положении – уровень надёжности технического объекта закладывается при его изготовлении. К контролируемым параметрам резцов относят их длину, массу, форму, размеры и материал режущей части и т.п. До последних десятилетий было принято считать, что технология изготовления резцов для дорожных фрез и горных машин полностью удовлетворяет запросам конечного потребителя. Однако, это утверждение, вероятнее всего, относится к разряду завышенных ожиданий и обещаний производителей резцов. Стоимость резцов, до недавнего времени, не выливалась для производителя работ в сложную экономическую проблему. Изменение ситуации произошло по ряду причин внешнего и внутреннего свойства. К внешним причинам относится, например, международные санкции

к России, приведшие к ряду ограничений, в том числе и с поставками высокотехнологического оборудования, материалов и т.п. в Россию. Среди внутренних причин следует отметить:

- наблюдающиеся сложности в замещении импорта;
- огромные размеры страны;
- неразвитость транспортной и логистической систем отдельных регионов страны, особенно сырьевых территорий;
- смещение условий добычи полезных ископаемых в сырьевых центрах в сторону усложнения;
- переход к императиву «время – деньги»;
- вынужденное отступление от оправданного математической теорией надёжности свойственного россиянам выражения «запас карман не тянет».

Итоговый комплексный контроль резцов позволит не только обнаружить дефектные резцы, но и отобрать резцы по уровням их ключевых параметров.

Для контроля резцов для горных и строительно-дорожных машин могут быть использованы различные методы неразрушающего контроля по отдельности и в комплексе. Радиационные методы, основанные на измерении ослабления гамма- или рентгеновского излучения, позволяют решать всю совокупность необходимых задач измерения и дефектоскопии. Появление на рынке высокоэффективных источников и регистраторов рентгеновского излучения позволяет с определённой долей уверенности говорить о возможности тотального выходного контроля упомянутых выше резцов радиационными методами. Разумеется, на первом этапе речь может идти о наиболее ответственных рабочих органах, например, используемых при прокладке тоннелей или при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, где цена отказа в широком понимании этого словосочетания является чрезвычайно высокой.

Объект исследования: закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых радиографических изображений. Типовые дефекты горных и дорожных машин.

Предмет исследования: методы цифровой радиографии резцов горных и дорожных машин.

Практическая новизна: на данный момент отсутствует какая-либо система неразрушающего контроля резцов горных и дорожных машин, позволяющая повысить эксплуатационную безопасность и надежность эксплуатируемых в промышленности резцов.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

– Исследовать существующие типовые резцы горных и дорожных машин, а также возможные дефекты.

– Исследовать тенденцию в развитии радиационных методов неразрушающих испытаний, контроля и диагностики.

– Исследовать особенности регистраторов рентгеновского излучения для систем цифровой радиографии и способы формирования цифрового изображения.

– Произвести расчёт косвенных и прямых характеристик систем цифровой радиографии резцов для горных и дорожных машин.

– Провести экспериментальную проверку методики оценки характеристик систем ЦР.

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

Апробация работы. Основные положения выпускной квалификационной работы обсуждались на отчетах по НИР кафедры ФМПК в 2016 – 2018 годах.

На защиту выносятся:

– Математическая модель цифровой радиографии.

– Эффективность применения цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии применительно к контролю вращающихся и неподвижных резцов горных и дорожных машин.

1 Резцы для горных и строительно-дорожных машин

Резцы для горных машин (ГМ) и строительно-дорожных машин (СДМ) отличаются большим разнообразием по размерам и форме [1–2]. Принято несколько классификаций анализируемых резцов. В одной из классификаций резцы делят на радиальные и тангенциальные резцы. Основой такой классификации является расположение резцов относительно поверхности рабочего органа либо поверхности (линии) резания. Во второй классификации резцы делятся на поворотные и неподвижные резцы. Здесь под поворотными резцами понимаются резцы в форме тел вращения, которые могут вращаться вокруг своей оси. Вращение может быть свободным и принудительным. Неподвижные резцы жёстко закреплены на теле рабочего органа и изменение положения точек их поверхности в пространстве полностью определяется положением области крепления в пространстве. С достаточной степенью условности можно считать, что поворотные и неподвижные резцы состоят из головной части, армированной твёрдосплавной вставкой – износостойкой вставкой (ИСВ), державки и хвостовика.

1.1. Поворотные резцы

Вращающиеся (поворотные) резцы (ВР) широко используются при реконструкции дорог, при добыче твёрдых полезных ископаемых, при строительстве тоннелей. При нормальном вращении таких резцов в процессе разработки сред центр зоны их контакта с разрушаемой средой перемещается по окружности, поэтому наконечник – ИСВ изнашивается равномерно, что приводит к повышению долговечности таких резцов. Блокирование вращения приводит к формированию односторонней поверхности износа, отличной от конической поверхности. Наличие односторонней поверхности износа затрудняет внедрение конкретного резца в разрушаемую среду, увеличивается нагрузка на соседние резцы, в результате чего резцы, рабочий орган в целом и

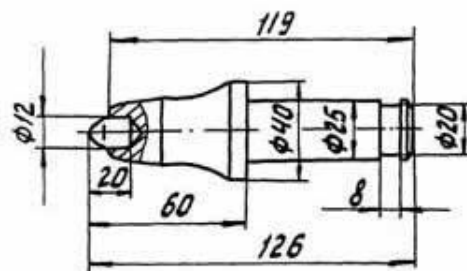
узлы базовой машины могут испытывать ненормативные механические нагрузки. Поэтому соблюдение ряда характеристик вращающихся резцов на стадии их изготовления является важнейшей процедурой измерений.

На рисунке 1 приведён внешний вид некоторых поворотных резцов отечественных производителей [4].

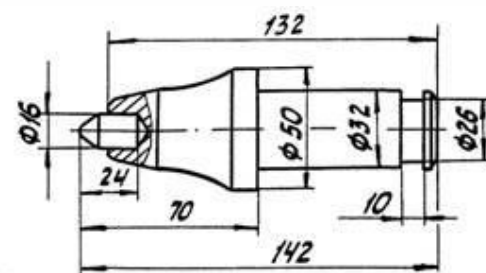
Марка Внешний вид
ПС-1



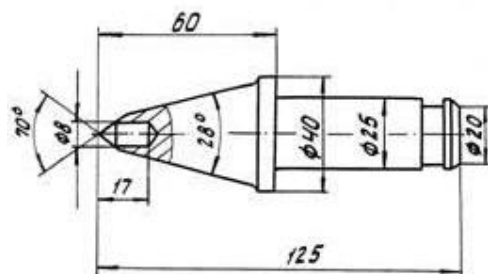
Геометрические характеристики



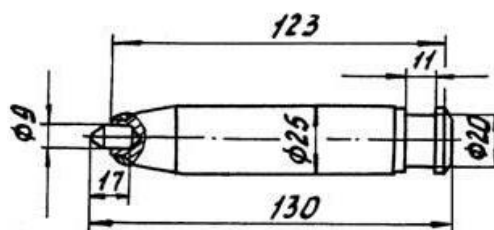
ПС-2



ПС-18У



РКС-1И



РД-16А

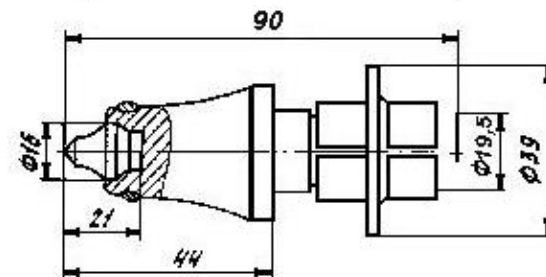
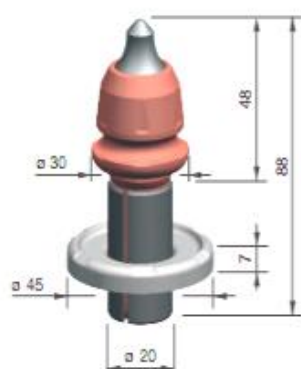


Рисунок 1 – Поворотные резцы российского производства

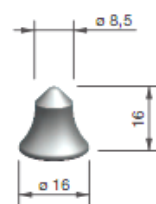
Основным производителем поворотных резцов является Wirtgen International GmbH Германия [5–7]. Эта фирма обладает исключительно широкой номенклатурой выпускаемых резцов, причём резцы отличаются размером и формой твёрдосплавных наконечников. На рисунке 2 приведены изображения трёх наиболее типичных резцов и соответствующих наконечников. Остальные резцы отличаются от приведённых на рисунке размерами наконечников – ИСВ.

Марка
W4-G/20

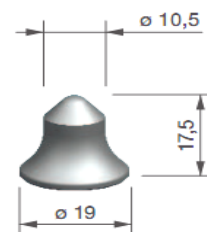
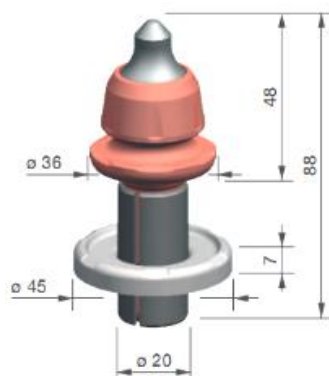
Внешний вид резца



Наконечник



W6-G/20



W1-8/13

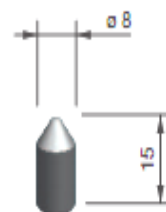
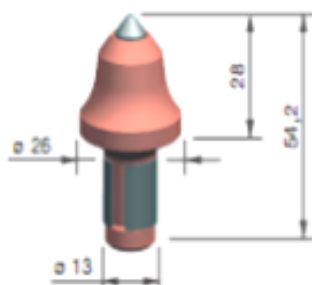


Рисунок 2 – Поворотные резцы фирмы Wirtgen

На рисунке 2 приведен внешний вид наиболее типичных вращающихся резцов фирмы Wirtgen, более полная их номенклатура указана в приложении 1.

Качество вращающихся резцов, а также их функциональное предназначение, существенным образом зависит от формы ИСВ. Изображения некоторых ИСВ фирмы Wirtgen с указанием массы приведены в приложении 2.

В приложении 3 приведена конструкция ИСВ фирмы WIRTGEN с указанием характерных размеров.

1.2. Неподвижные резцы

Неподвижные резцы (НР), часто называемые зубками, широко применяются в гражданском и промышленном строительстве и в качестве режущего инструмента врубовых машин. Для создания значимых разрушающих усилий неподвижные резцы имеют две почти параллельные грани, расстояние между которыми невелико по сравнению с другими размерами резца. Такие резцы иногда называют плоскими резцами.

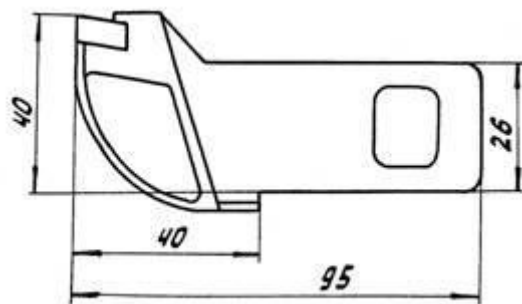
На рисунке 3 приведены два типовых по форме образца плоских резцов для горных и дорожных машин российского (Копейский завод) [4] и зарубежного производства (фирма Vetek) [8].

Износостойкие вставки НР имеют вид форму плоскопараллельных пластин или пластин с заострением в сторону резания породы. Материал ИСВ, как правило, изготавливается из карбида вольфрама – WC методом спекания соответствующего порошка. В материал ИСВ помимо карбида вольфрама добавляют кобальт (Co) и т.п. [9–11]. Плотность материала ИСВ принимает значения в диапазоне от 15 до 15,5 г/см³. Износостойкая вставка прикрепляется к телу резца пайкой. Для пайки используются медно-цинковые припои. Помимо твёрдости и износостойкости материала ИСВ на долговечность резцов влияет качество паяного соединения.

Марка Внешний вид резца
РП-3М



Геометрические характеристики



BF-50

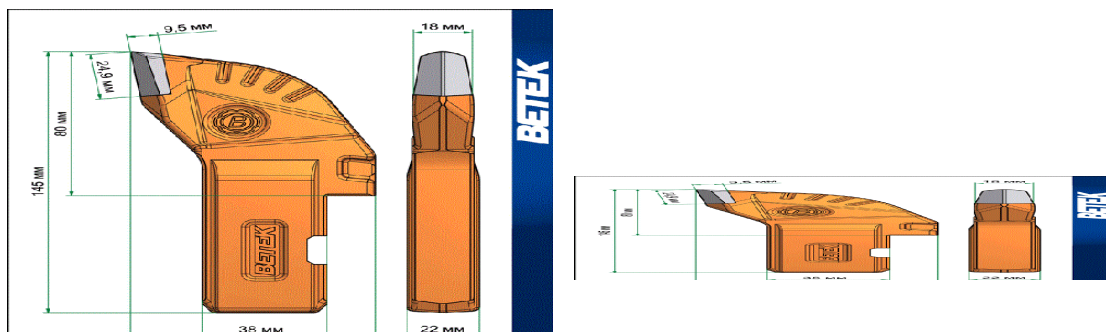


Рисунок 3 – Плоские резцы для дорожных и горных машин

1.3. Дефекты резцов

Напомним, что согласно ГОСТ 15467-79 под дефектом понимается каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям. Выше отмечено, что к основным потребительским характеристикам резцов относятся их работоспособность и безотказность. Главным функциональным назначением резцов является резание (разрушение) соответствующей среды. Поэтому к качеству закрепления твёрдосплавного наконечника к телу резца выдвигаются особые требования. Наконечник соединяют с телом резца с помощью пайки. В ГОСТ 27947-88 отмечается, что рентгеновские методы применяют, в том числе, для выявления непропаев паяных соединений, а также для выявления геометрии расположения внутренних фрагментов ОК. Помимо непропая и отклонений от геометрии в резце могут иметься и традиционные дефекты металлических изделий – поры, трещины, инородные включения и т.п. Дефектом резцов является также несоответствие их массы и массы ИСВ техническим условиям.

Подчеркнём, что однородность совокупности резцов в рабочем органе (РО) существенным образом влияет на долговечность и безотказность рабочих органов СДМ и ГМ в целом. Здесь однородность резцов оценивается по набору параметров, к которым относятся: масса резца; масса ИСВ; линейные размеры резца; форма ИСВ.

1.4. Неразрушающие методы контроля резцов горных и строительно-дорожных машин

В работах [12,13] отмечено, что основными методами неразрушающих испытаний горных машин являются визуальные, акустические, радиационные, магнитные методы и метод проникающих веществ.

Одним из наиболее распространённых методов неразрушающего контроля линейных размеров и формы деталей машин является оптический метод [14].

Продолжает оставаться востребованным метод неразрушающего контроля и диагностики, основанный на измерении функциональных характеристик ГМ и СДМ в процессе их эксплуатации [15, 16].

Очевидно, что уровень надёжности ГМ и СДМ определяется качеством производства этих машин и их рабочих органов и необходимо уделять максимум внимания неразрушающему контролю на стадии производства всех элементов рассматриваемых машин [17].

Каждый из методов неразрушающего контроля обладает своими достоинствами и недостатками. Например, визуальные и оптические методы контроля позволяют оценивать форму объекта контроля и обнаруживать исключительно поверхностные дефекты. Метод проникающих веществ предназначен для обнаружения поверхностных дефектов и дефектов, имеющих капиллярную связь с поверхностью. В магнитных и электромагнитных методах в их различных вариациях сложно дать однозначное заключение о дефектности изделия и связать параметры информативного сигнала с размером и

локализацией дефектной области. Применение активных акустических методов контроля ограничено формой анализируемых объектов контроля (см. рис. 1–3). В подобных ОК акустический сигнал испытывает множество последовательных отражений, приводящих к невозможности интерпретации внутренней структуры объекта и, следовательно, достижения цели контроля.

Радиационные методы основаны на использовании различных видов ионизирующих излучений, самым востребованными среди которых являются гамма- и рентгеновское излучения. Указанные излучения не отличаются по физическим закономерностям взаимодействия с веществом. Всё различие заключается в форме энергетического спектра источников излучения, так для источников гамма-излучения природного и техногенного происхождения энергетический спектр является линейчатым, а для источников рентгеновского излучения – непрерывным. Многообразие физических закономерностей, связанных с гамма- и рентгеновским излучением, обуславливает широту областей их применения в науке, медицине и различных отраслях промышленности. Целью данной работы является научное и техническое обоснование возможности испытания резцов горных и строительно-дорожных машин методами цифровой радиографии, поэтому ниже будут вопросы, связанные с этим.

1.5. Тенденции в развитии радиационных методов неразрушающих испытаний, контроля и диагностики

До недавнего времени радиационные методы неразрушающих испытаний, контроля и диагностики были не в полной мере использованы при производстве резцов для ГМ и СДМ. Этому есть ряд объяснений, которые не всегда являются оправданными. Среди таких объяснений отметим следующие предположения:

1 – анализируемые резцы не являются изделиями ответственного назначения;

2 – низкая цена резцов;

3 – технология производства резцов настолько развита, что нет необходимости применять на производстве методы и средства неразрушающего контроля;

4 – радиационные методы контроля отличаются недостаточно высокой производительностью;

5 – качество испытаний объектов контроля в плане контроля линейных размеров, обнаружения дефектов оставляет желать лучшего;

6 – высокая удельная стоимость контроля технических изделий;

7 – невозможность контроля анализируемых изделий в непрерывном потоке;

8 – сверхжёсткие требования к соблюдению норм радиационной безопасности (НРБ).

Ряд указанных предположений в настоящее время продолжают оставаться сдерживающими факторами, например, соблюдение норм и ограничений радиационной безопасности. Следует отметить наблюдающееся в последнее десятилетие повышение экономической эффективности применения систем ЦР в промышленности [18–20]. Указанное повышение связано с двумя основными тенденциями:

– непрекращающимся совершенствованием источников рентгеновского излучения (ИРИ);

– революционными изменениями в производстве регистраторов рентгеновского излучения (РРИ).

Совершенствование ИРИ происходит в нескольких конкурирующих направлениях. Первое направление совершенствования ИРИ обуславливается уменьшением размеров излучающей поверхности (фокусного пятна). Второй вектор направлен в сторону увеличения интенсивности ИРИ. Третье направление связано с увеличением верхнего предела диапазона максимальных энергий рентгеновского излучения, в настоящее время этот предел для коммерческих рентгеновских аппаратов достиг уровня 850 кэВ.

Следует отметить, что включение в системы ЦР усовершенствованных в любом из направлений ИРИ приводит, как правило, к существенному увеличению финансовых трат. Причём стоимость высокоинтенсивных ИРИ с малым размером фокусного пятна (менее 0,1 мм) и максимальной энергией фотонов свыше 450 кэВ является излишне высокой для применения в промышленных системах ЦР.

Революционные изменения в производстве РРИ характеризуются достижением радиационно-чувствительными преобразователями (РЧП) пространственного разрешения (ПР) на уровне десятка микрон и менее. Указанный уровень ПР достигается двумя путями: уменьшением толщины РЧП; обособлением элементарных чувствительных объёмов с одновременным уменьшением их поперечного размера. Здесь под элементарным чувствительным объёмом понимается некоторый объём, поглощённая энергия в котором опосредствованно или непосредственно трансформируется в информативный аналоговый сигнал, а затем в цифровой сигнал. В настоящее время в ЦР используются два основных типа РРИ – непрямого (комбинированные РРИ) и прямого преобразования. Комбинированные регистраторы рентгеновского излучения состоят из радиационно-оптических преобразователей (РОП) и фотоприёмников (ФП). В первичном преобразователе (в РОП) поглощённая энергия рентгеновского излучения преобразуется в энергию световых фотонов, которая в дальнейшем регистрируется фотоприёмниками, а аналоговый сигнал в аналогово-цифровом преобразователе трансформируется в цифровой сигнал.

Увеличение максимальных энергий ИРИ и совершенствование РРИ привело к расширению номенклатуры объектов контроля, которые ранее считались непригодными к контролю по ряду ограничений физического и технического плана. Заметный прогресс в области конструирования и производства высокоэффективных источников и регистраторов рентгеновского излучения позволил существенно сузить упомянутые выше ограничения. Рост максимальных энергий ИРИ привёл к увеличению проникающей способности

ЦР. Уменьшение размеров фокусных пятен рентгеновских излучателей и миниатюризация элементарных чувствительных объёмов РРИ позволило разрабатывать системы ЦР с пространственным разрешением, близким к предельным уровням разрешения в классической радиографии с регистрацией на рентгеновскую плёнку.

Вернёмся к списку упомянутых выше недостаточно обоснованных предположений.

На первое предположение можно отметить ряд задач использования ГМ и СДМ, в которых такие простые изделия как резцы приобретают функцию ответственного назначения. Примером таких задач является, например, предотвращение либо ликвидация последствий чрезвычайной ситуации природного или техногенного происхождения. Удалённость территории разведки и добычи стратегических полезных ископаемых от мест производства резцов. Следует отметить, что указанное справедливо и для всех прочих комплектующих.

Второе недостаточно аргументированное предположение связано с ценой резцов. В настоящее время мерилем эффективности применения техники являются экономические показатели, которые связаны с популярной фразой – «время – деньги». Спецификой применения режущих рабочих органов является возможность наступления «цепной реакции отказов», отказ единичного резца может привести к отказу рабочего органа (РО) без возможности восстановления РО, а отказ РО может привести к отказу машины или комплекса в целом с полной потерей работоспособности и без возможности восстановления. Приведённый выше случай как нельзя лучше описывается цепочкой катастрофических событий из стихотворения Самуила Яковлевича Маршака «Гвоздь и подкова». Позволим себе привести интерпретацию этого условно «детского» произведения применительно к рассматриваемой нами задаче, смотри таблицу 1.

Таблица 1 – О технической интерпретации стихотворения С.Я. Маршака «Гвоздь и подкова»

Текст стихотворения	Техническая интерпретация
Не было гвоздя – подкова пропала.	Не было качественного резца – ограничение работоспособности рабочего органа.
Не было подковы – лошадь захромала.	Ограничение работоспособности рабочего органа – ограничение работоспособности машины в целом.
Лошадь захромала – командир убит.	Ограничение работоспособности машины является причиной катастрофического отказа.
Конница разбита – армия бежит.	Катастрофический отказ машины приводит к срыву планового задания и экономическому краху предприятия.
Враг вступает в город, пленных не щадя.	Банкротство предприятия, увольнение персонала без выходного пособия.
Оттого, что в кузнице не было гвоздя.	Без комментариев!!!

Интерпретация, разумеется, является несколько прямолинейной, но основывается на здравом смысле. История техногенных катастроф, повлекших за собой огромные человеческие жертвы и приведших к колоссальным материальным затратам, свидетельствует, что начало и развитие таких катастроф зачастую связано с некачественной простой деталью: болтом; гайкой; осью; балкой.

Третий аргумент свидетельствует о некоторых устоявшихся иллюзиях и застое в отношениях между потребностями и предложением, потребителем и производителем. Настоящий период времени характеризуется повышением потребительских запросов к функциональности, надёжности и безопасности деталей, узлов, оборудования и машин в целом. Многие технологии не в полной мере удовлетворяют конечного потребителя, а совершенствование технологий невозможно без применения высокоэффективных методов неразрушающих испытаний, в том числе и методов ЦР и РВТ.

Комментарии к прочим предположениям приведены выше. Дополним эти комментарии народной поговоркой – «скупой платит дважды». Более точно и справедливо не дважды, а многожды. Это же справедливо и по отношению к затратам на обеспечение требований НРБ.

2. Математическая модель комплекса цифровой радиографии

Выше подчёркнуто, что за предыдущие двадцать лет отмечена тенденция к радикальным изменениям в области разработки методов и средств неразрушающих испытаний, контроля и диагностики разнообразных объектов природного и техногенного происхождения. Ещё более значимые явления произошли в методах и средствах ЦР и РВТ [21–25]. Совершенствование комплексов ЦР и РВТ происходит по двум основным направлениям: систем детектирования и излучателей рентгеновского и тормозного излучения [26,27]. Собственная разрешающая способность наиболее совершенных из современных регистраторов рентгеновского излучения достигла единиц микрон и менее. Высокий уровень пространственного разрешения и низкое значение времени контроля комплексов цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии невозможно было бы достичь без нового поколения источников рентгеновского и тормозного излучения [28–30]. Представители этого нового поколения являются более совершенными по сравнению с прежним поколением электрофизической аппаратуры по критериям, связанным с высокой удельной мощностью излучения малостью размеров фокусного пятна ИРИ. На текущем этапе развития цифровой радиографии конструирование соответствующих комплексов фактически сводится к выбору ИРИ, РРИ и при необходимости механической системы сканирования и позиционирования. Выбор осуществляется из составляющих, имеющихся на рынке. Критерием выбора является способность обеспечить потребительские запросы к испытаниям и контролю. Рациональный выбор составляющих комплекса ЦР невозможен без научного обоснования возможности достижения целей проектирования. Научное обоснование должно базироваться на теоретических исследованиях, результаты которых проверяются экспериментальным путём. Основой теоретических исследований является математическая модель комплекса ЦР, которая связывает потребительские характеристики проектируемого комплекса и параметры ИРИ,

РРИ с учётом специфики объекта контроля, его материала, профиля, размеров и т.п. Следует отметить, что помимо значимых прямых потребительских характеристик комплекса ЦП, которые задаются в техническом задании на проектирование: предельный уровень радиационного контраста, пространственное разрешение и производительность контроля, существуют и вспомогательные характеристики, используемые широко в практике конструирования комплексов ЦР и РВТ. К вспомогательным характеристикам относятся:

- эффективный (интегральный) и средний (дифференциальный) ЛКО или МКО рентгеновского излучения;
- кратность ослабления или радиационная прозрачность ОК; толщина ОК в длинах свободного пробега (ДСП);
- отношение сигнал/шум (ОСШ), вызванное заданным дефектом.

Достоинством вспомогательных (непрямых) характеристик ЦР является возможность быстрой коррекции виртуального выбора составляющих ЦР путём вариации параметров математической модели и сопоставления результатов коррекции с результатами натуральных испытаний.

2.1. Особенности регистраторов рентгеновского излучения для систем цифровой радиографии

Качество цифровых радиографических изображений и, следовательно, качество радиографического контроля существенным образом связано с видом, конструкцией и параметрами регистраторов рентгеновского излучения. Выше отмечено, что в комплексах ЦР применяются детекторы непрямого и прямого преобразования энергии, переданной фотонами РЧП. Главными потребительскими характеристиками комплексов ЦР принято считать радиационный контраст, пространственное разрешение и производительность, поэтому эти характеристики положены в основу критериев сравнения различных реализаций ЦР [31].

Первичный преобразователь, он же радиационно-чувствительный преобразователь, является основой РРИ и именно он определяет предельные (ожидаемые) потребительские характеристики комплексов ЦР.

В настоящее время в качестве ПП используются для РРИ непрямого преобразования сцинтилляторы, а для РРИ прямого преобразования – полупроводниковые детекторы (ППД). В последнее десятилетие наметилась тенденция применения ПП прямого преобразования в системах регистрации рентгеновского излучения для ЦР. Тем не менее, регистраторы с первичными преобразователями непрямого преобразования (комбинированные РРИ) преобладают на рынке РРИ. В комбинированных РРИ процесс превращения поглощённой энергии фотонов в электрический ток (заряд) является двухэтапным. Первый этап связан с преобразованием энергии, переданной фотонами рентгеновского излучения материалу ПП, в энергию световых фотонов. Энергия световых фотонов регистрируется фотоприёмников (фотопреобразователем) ФП. В качестве ФП используются специализированные ППД – фотодетекторы (ФД), с которых и снимается аналоговый сигнал и передаётся на вход АЦП с последующим формированием цифрового сигнала. По конструкции ПП непрямого преобразования могут быть: многоэлементными ПП с условной эквивалентностью элементов; моноблоками – монокристаллическими сцинтилляторами (экранами), поликристаллическими экранами и экранами из сцинтилляционной керамики. Первичный преобразователь комбинированных регистраторов исполняют в виде прямоугольной панели либо полоски (линейки). Панель либо линейку сопрягают с матрицей (линейкой) ФП. Каждый фотопреобразователь матрицы или линейки (элемент ФП) ассоциируют с конкретным пикселем. Световое излучение, попадающее на фронтальную поверхность некоторого элемента ФП, может формироваться в объёме, расположенном не только непосредственно перед фотопреобразователем (по перпендикуляру). Логично назвать указанный объём эффективным чувствительным объёмом. Соседние эффективные чувствительные объёмы могут влиять друг на друга. Степень такого влияния

зависит от конструкции ПП и вовлеченности во влияние различных физических факторов. К таким физическим факторам относится световое и радиационное натекание. Следует отметить, что радиационное натекание реализуется вторичными рентгеновскими фотонами и вторичными электронами. Очевидно, что РРИ разделяются по степени обособленности эффективных чувствительных объёмов, причём разделяют световую и радиационную обособленность. Степень обособленности эффективных чувствительных объёмов минимальна для сцинтилляционных и поликристаллических экранов. Эффективные чувствительные объёмы в собственно матричных и линейных регистраторах могут быть обособлены оптически и радиационно. Оптическое обособление достигается слоем краски, а радиационное обособление – защитными экранами. Введение защитных экранов в матричные детекторы обуславливает появление «мёртвых зон» на радиографических изображениях, компенсируемое специальной организацией формирования изображений. В настоящее время наибольшее использование в системах регистрации в цифровой радиографии получили сцинтилляционные кристаллы CsI, CdWO₄ и сцинтилляционная керамика Gd₂SO₂.

Характерной особенностью первичных преобразователей на основе прямого преобразования является, помимо принципа регистрации, их многоэлементная (матричная) структура. Естественно ожидать существенное радиационное влияние соседних элементов ПП друг на друга.

Заметим, что на выходе РРИ на основе сцинтилляционных или поликристаллических экранов формируется световое (явное) изображение. Впрочем, это явное изображение трансформируется фотопреобразователем в скрытое (виртуальное) изображение. Для РРИ прямого преобразования изображение изначально является виртуальным изображением. Переход из виртуальности в реальность приводит к превращению виртуального изображения в цифровое радиографическое изображение.

2.2. Формирование цифровых радиографических изображений

Основой математической модели комплексов цифровой радиографии является описание процесса формирования цифровых радиографических изображений, например, [32]. Подробно и поэтапно обсудим это описание применительно к панельным регистраторам непрямого преобразования рентгеновского излучения.

Выше отмечено, что на выходе РРИ любого типа формируется виртуальное теневое радиационное изображение, представляющее собой упорядоченную совокупность аналоговых сигналов. Пусть каждый аналоговый сигнал формируется на своём ФП с площадью поперечного сечения s , мм². Напомним, что каждому ФП соответствует свой эффективный чувствительный объём ПП. Математическая модель процесса формирования цифровых радиографических изображений строится в геометрии узкого мононаправленного пучка излучения.

Пусть объект контроля представляет собой плоскопараллельную пластину из материала с эффективным атомным номером Z и массовой толщиной ρH , г/см². Лобовая поверхность РРИ с толщиной первичного преобразователя h , см параллельна плоскостям ОК. На объект контроля по перпендикуляру падает пучок рентгеновского излучения с максимальной энергией E_{\max} , кэВ и энергетическим спектром $f(E, E_{\max})$. Здесь энергетический спектр представляет собой нормированное распределение числа фотонов по энергии и является плотностью распределения случайной величины E . Плотность потока рентгеновских фотонов равна n_0 , 1/(мм²·с). Рассмотрим интегральный режим регистрации рентгеновского излучения со временем измерения t . Принято считать, что аналоговый сигнал с фотопреобразователя $J(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ пропорционален энергии рентгеновского излучения, поглощённой в эффективном чувствительном объёме РЧП. Обозначим через C_t соответствующий коэффициент пропорциональности (коэффициент преобразования).

Формула для оценки аналогового сигнала имеет вид [32]

$$J(E_{\max}, Z, \rho H, h) = C_t t \left(n_0 s \int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE + e_d \right) = \quad (1)$$

$$= I(E_{\max}, Z, \rho H, h) + t e_d$$

здесь $E_{ab}(E, h)$ – среднее значение поглощённой энергии, переданной фотоном с энергией E эффективному чувствительному объёму РЧП; $\varepsilon(E, h)$ – энергетическая зависимость эффективности регистрации (ЭР) рентгеновского излучения; $m(E)$ – энергетическая зависимость массового коэффициента ослабления (МКО) излучения; e_d – энергетический эквивалент темновых токов регистратора. Величины e_d оцениваются экспериментально при выключенном источнике рентгеновского излучения для каждого канала РРИ и используются на стадии калибровки по «чёрному». В (1) сигнал $I(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ свободен от темновых сигналов.

Среднее значение поглощённой энергии $E_{ab}(E, h)$ зависит не только от энергии фотонов E и от толщины РЧП h , но и от материала РЧП, поперечных размеров эффективного чувствительного объёма, поэтому экспериментальная оценка указанных зависимостей в полном объёме не представляется возможным в силу ограниченности материальных ресурсов. С середины XX-го века с появлением первых вычислительных машин развиваются методы Монте-Карло, позволяющие заменить натуральный эксперимент его имитацией – вычислительным экспериментом. Сопоставление результатов натуральных и вычислительных экспериментов применительно к физике переноса ионизирующих излучений многократно доказало обоснованность замены сложных натуральных экспериментов вычислительными экспериментами на основе методов Монте-Карло. Поэтому исследование зависимостей, описанных выше, проводят исключительно методом Монте-Карло [33]. Ниже будет рассмотрен случай регистраторов, чувствительные объёмы которых имеют наиболее значимую оптическую и радиационную связь друг другом. К таким регистраторам относятся панельные регистраторы.

Аналоговые сигналы $J(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ с ФП поступают на вход АЦП разрядностью l , который преобразует их в цифровые сигналы. Аналоговые сигналы вида (1) трансформируются аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП) в цифровые сигналы. Цифровой сигнал принимает целочисленные значения в диапазоне от нуля до $L = 2^l - 1$. Следует учесть, что максимальное значение аналогового сигнала J наблюдается для $\rho H = 0$. В соответствии со сказанным выше «единица» АЦП соответствует интервалу Δ

$$\Delta = \frac{CI(E_{\max}, Z, 0, h)}{(2^l - 1)}, \quad (2)$$

здесь C , $C > 1$ – коэффициент, который предотвращает переполнение АЦП при возможных флуктуациях аналоговых сигналов.

Связь аналогового сигнала $J(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ и цифрового сигнала $J_d(E_{\max}, Z, \rho H, h)$

$$J_d(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \text{int} \left(\frac{J_d(E_{\max}, Z, \rho H, h)}{\Delta} \right). \quad (3)$$

В формуле (3) обозначение int – функция, равная целой части аргумента.

Выражения (1)–(3) нуждаются в ряде пояснений и рекомендаций. В работах [34,35] приведены распределения интенсивности по энергии для высокоэнергетических спектров тормозного излучения. Происхождение рентгеновского излучения и высокоэнергетического тормозного излучения связано с торможением ускоренных электронов, поэтому аналитические описания из статей [34,35] могут быть использованы не только для диапазона максимальных энергий от 1 до 10 МэВ, но и для диапазона максимальных энергий от 100 до 850 кэВ. Основной целью текущего раздела диссертации является построение уравнений связи прямых и косвенных потребительских характеристик систем ЦР с параметрами составляющих и ОК, поэтому для описания энергетического спектра ИРИ воспользуемся максимальным

упрощением формулы Крамерса¹ с поправкой на предварительную фильтрацию излучения. Максимальное упрощение формулы Крамерса сводится к представлению распределения интенсивности по энергии убывающей линейной функцией. Предварительная фильтрация применяется в ЦР для ужесточения рентгеновского излучения и меньшего влияния на результаты контроля немоноэнергетичности излучения. Дополнительным положительным фактором предварительной фильтрации является устранение особенности, отмеченной в работе², для расчёта числа фотонов с малой энергией. Формула для вычисления искомого энергетического спектра рентгеновского излучения $f(E, E_{\max})$ имеет вид

$$f(E, E_{\max}) = \frac{(E_{\max} - E)e^{-\mu_f(E)h_f}}{E \int_0^{E_{\max}} \frac{E_{\max} - E}{E} e^{-\mu_f(E)h_f} dE}, \quad (4)$$

здесь $\mu_f(E)$ – энергетическая зависимость линейного коэффициента ослабления (ЛКО) излучения для материала предварительного фильтра; h_f – толщина фильтра. Формула (4) с высокой точностью приближается к аппроксимациям энергетического спектра из [34,35].

Выражение, которое описывает энергетическую зависимость эффективности регистрации, выглядит следующим образом

$$\varepsilon(E, h) = 1 - e^{-\mu(E)h}, \quad (5)$$

где $\mu(E)$ – энергетическая зависимость ЛКО излучения для материала первичного преобразователя рентгеновского излучения.

Необходимые в (1), (4), (5) энергетические зависимости МКО и ЛКО излучения вычисляются с помощью библиотеки [36], в которой приведены сечения взаимодействия гамма-излучения с веществом.

¹ Kramers H.A. XCIII. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1923. – Vol. 46. – No. 275. – P. 836–871.

² Udod V., Shteyn A., Shteyn M., Chakhlov S., Temnik A., Klimenov V. Energy spectrum modification of bremsstrahlung X-ray intensity // Proceedings of the 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6–10, 2014, Prague, Czech Republic.– P. 211.

Энергетическая зависимость среднего значения поглощённой энергии $E_{ab}(E, h)$ для сцинтилляционных и поликристаллических экранов аппроксимируется выражением из [33]

$$\overline{E_+}(E, h) = \overline{E_{\min}}(E) + (E - \overline{E_{\min}}(E))(1 - e^{-p\mu(E)h}). \quad (6)$$

Параметр аппроксимации p определяется материалом сцинтиллятора: $p_{\text{CsI}}=0,85$ $p_{\text{CWO}}=0,75$. В западных странах аббревиатура CWO указывает на вольфрамат кадмия.

Аппроксимация энергетической зависимости $\overline{E_{\min}}(E)$ имеет вид [33]

$$\overline{E_{\min}}(E) = E \frac{\mu_{\text{foto}}}{\mu} + (E - 1,02) \frac{\mu_{\text{par}}}{\mu} + \pi r_0^2 N_e \frac{0,511}{\mu} \times \left[\frac{-20\alpha^4 + 102\alpha^3 + 186\alpha^2 + 102\alpha + 18}{3\alpha(1 + 2\alpha)^3} - \frac{2\alpha + 3 - \alpha^2}{\alpha^2} \ln(1 + 2\alpha) \right]. \quad (7)$$

где $r_0^2 = 7,94 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$; N_e – число электронов в 1 см^3 материала РЧП; μ_{foto} , μ_{par} – ЛКО, связанные с эффектом фотопоглощения и эффектом рождения пар; $\alpha = E/0,511$, здесь энергия E выражена в МэВ.

Естественным предположением является то, что свой вклад в утечку энергии из объёма РЧП вносят вторичные электроны. Причём значимость этого фактора усиливается с возрастанием энергии вторичных электронов, и, следовательно, с возрастанием энергии первичных фотонов. Энергетическая зависимость оценки зависимости $E_{ab}(E, h)$ снизу – $\overline{E_-}(E, h)$ может быть осуществлена на основе формул и рекомендаций из [37]. Для оценки зависимости $\overline{E_-}(E, h)$ можно рекомендовать вставить в выражение (6) множитель, который учитывает утечку вторичных электронов в приближении прямо вперёд. Такое приближение является недостаточно точным, но приемлемо на этапе разработки рекомендаций по проектированию комплексов ЦР.

Совокупность выражений (1)–(7) позволяет описать связь цифровых сигналов с РРИ с основными параметрами проектируемого комплекса ЦР и объекта контроля.

2.3. Характеристики комплексов цифровой радиографии

Для полномасштабного описания комплексов (систем) ЦР как с точки зрения потребителя, так и проектировщика используют совокупность прямых и косвенных характеристик [38,39]. Системы ЦР являются, прежде всего, системами визуализации (СВ). Подобные системы характеризуются предельно достижимыми уровнями радиационного контраста и пространственного разрешения, а также производительностью, обеспечивающей цели контроля. В настоящее время расширяются приложения систем ЦР и РВТ как многофункциональных средств измерения разноимённых величин, в подобных случаях к отмеченным выше характеристикам добавляется достижимая точность измерения соответствующих величин. Для функционирования системы ЦР в режиме традиционного дефектоскопа особый интерес представляет отношение сигнал/шум (ОСШ) для заданного дефекта.

Прямые характеристики систем ЦР и РВТ одновременно являются их главными потребительскими характеристиками. Для оценки этих характеристик используются расчётные и экспериментальные методы. Разумеется, расчётные методы должны базироваться на адекватной математической модели и их результаты проверяются экспериментально похожих объектов и родственной задачи контроля. Потребительские характеристики ЦР в расчётах оцениваются по косвенным характеристикам проектируемых систем. Необходимо отметить следующие значащие косвенные характеристики ЦР:

- интегральную эффективность регистрации;
- интегральные и дифференциальные массовые коэффициенты рентгеновского излучения;

- кратность ослабления излучения (радиационную прозрачность);
- толщину в ДСП;
- среднее значения поглощённой энергии;
- среднее значение квадрата поглощённой энергии зарегистрированного фотона;
- коэффициент накопления флуктуаций.

Причина введения и исследования косвенных характеристик связана, как правило, с возможностью оценки этих характеристик с помощью достаточно простых и оправданных с физической точки зрения теоретических соотношениях. Каждая из косвенных характеристик имеет свою особенность применения, соответствует другим косвенным характеристиками систем ЦР и её величина, по большей части, может быть оценена экспериментально.

2.3.1. Интегральная эффективность регистрации

Для моноэнергетического источника гамма-излучения ЭР по определению отношению числа зарегистрированных фотонов к общему числу фотонов, падающих на фронтальную поверхность РЧП. В этом случае ЭР оценивается по формуле (5). По аналогии вводится характеристика РРИ ε_{int} , которую можно назвать интегральной эффективностью регистрации. Она учитывает энергетический спектр рентгеновского излучения и режим регистрации. Формула для оценки интегральной эффективности регистрации ε_{int} имеет вид

$$\varepsilon_{int}(E_{max}, Z, \rho H, h) = \frac{\int_0^{E_{max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{max}) e^{-m(E, Z)\rho H} dE}. \quad (8)$$

Из анализа формулы (8) можно сделать вывод о том, что соответствующее определение не обладает свойством универсальности, так как ε_{int} зависит не только от толщины и материала РЧП и максимальной энергии

ИРИ, но и от параметров объекта контроля. Формула (8) выведена для АЦП с гипотетической разрядностью $l=\infty$. Практическая (экспериментальная) оценка интегральной эффективности регистрации ε_{int} сопряжена с некоторыми материальными затратами, так как требует дополнительного (эталонного) РРИ, радиационно-чувствительный преобразователь которого является «детектором полного поглощения», и АЦП более высокой разрядности. С учётом сказанного выше выражение для экспериментальной оценки интегральной эффективности регистрации записывается следующим образом

$$\varepsilon_{int}(E_{max}, Z, \rho H, h) = \frac{J_d(E_{max}, Z, \rho H, h) - J_d(E_{max}, Z, \infty, h)}{J_{d\infty}(E_{max}, Z, \rho H, \infty) - J_{d\infty}(E_{max}, Z, \infty, \infty)}. \quad (9)$$

Индекс d_∞ в знаменателе означает, что разрядность АЦП эталонного РРИ существенно выше номинальной разрядности АЦП. В формуле (9) исходные сигналы для сравниваемого регистратора и регистратора «полного поглощения» подвергаются калибровке по «чёрному».

Техническая реализация РРИ «полного поглощения» высокоэнергетического рентгеновского и тормозного излучения представляет значительные трудности.

Совокупность формул (3)–(8) является основой расчётной оценки ожидаемой интегральной эффективности регистрации. С помощью указанных формул можно исследовать влияние параметров ИРИ, РРИ и ОК на величину ε_{int} .

Комментарий. Интегральная эффективность регистрации по внутренней сущности своего определения представляет собой коэффициент полезного использования рентгеновского излучения и через число зарегистрированных частиц влияет на прочие прямые и косвенные параметры систем ЦР. Разработчики ИРИ прилагают максимум усилий для повышения мощности излучения, а некорректный подбор РРИ при проектировании систем ЦР сводит указанные колоссальные усилия практически к нулю. Впрочем, следует отметить, что проектировщики систем ЦР сталкиваются с непониманием заказчиком противоречивости некоторых требований относительно

потребительских характеристик систем ЦР. Так выполнение необоснованных требований повышения разрешающей способности систем приводит к снижению производительности контроля.

2.3.2. Кратность ослабления рентгеновского излучения и радиационная прозрачность объекта контроля

В название раздела преднамеренно вынесены два практически эквивалентных понятия, которые характеризуют ослабление рентгеновского излучения объектом контроля. Кратность ослабления рентгеновского излучения при неизменной геометрической схеме контроля характеризует возмущение вносимое объектом контроля в поле рентгеновского излучения. Численно кратность ослабления M с учётом регистрации излучения равна отношению интенсивности (потока) невозмущённого рентгеновского излучения (без ОК) к интенсивности (потоку) возмущённого рентгеновского излучения (с ОК). Кратность ослабления M определяет во сколько раз максимальное значение аналогового сигнала больше минимального значения, что является необходимым информационным параметром обоснованного выбора разрядности АЦП или установления существующей реализации системы ЦР поставленной потребителем (заказчиком) задаче контроля. В соответствии с определением формула для оценки интегральной (эффективной) кратности ослабления $M(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ имеет вид

$$M(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}. \quad (10)$$

Кратность ослабления $M(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ экспериментально оценивается по формуле

$$\tilde{M}(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{I_d(E_{\max}, Z, 0, h) - I_d(E_{\max}, Z, \infty, h)}{I_d(E_{\max}, Z, \rho H, h) - I_d(E_{\max}, Z, \infty, h)}. \quad (11)$$

Термин – радиационная прозрачность является таким же популярным и распространённым, как и кратность ослабления, и представляет собой понятие, вытекающее из здравого смысла. Оценка радиационной прозрачности T связана с оценкой кратности ослабления M простейшим соотношением $T(E_{\max}, Z, \rho H, h) = M(E_{\max}, Z, \rho H, h)$.

Приведём одно замечательное ограничение, которое в корне исключает возможность применения систем ЦР с ненадлежащей разрядностью АЦП: $2^l > M(E_{\max}, Z, \rho H, h) - 1$.

2.3.3. Толщина объекта контроля в длинах свободного пробега

Термин «толщина в длинах свободного пробега (ДСП)» заимствован в радиационных методах неразрушающего контроля, испытаний и диагностики из физики защиты от рентгеновского излучения. Следует отметить, что этот термин стал естественным в цифровой радиографии по причинам, связанным с видом основного закона ослабления гамма-излучения объектом. Указанный закон гласит – интенсивность излучения за объектом контроля с возрастанием толщины описывается экспоненциальной функцией с отрицательным показателем, который пропорционален толщине ОК.

Анализ цифровых радиографических изображений в шкале интенсивностей для изделий с переменной толщиной является сложной задачей в силу того, что устройства визуализации полутоновых изображений и субъект, рассматривающий полутоновые изображения с подобных устройств, ограничены числом полутонов, не более 256. Преднамеренное логарифмирование совокупности цифровых сигналов позволяет анализировать трансформированные изображения в шкале толщин объекта контроля в ДСП. Отметим, что для монохроматических источников гамма-излучения такая шкала с точностью до множителя совпадает со шкалой толщин объекта в единицах линейных размеров (миллиметрах, сантиметрах и т.п.). Это означает, что указанный вид трансформации радиографических изображений логично

назвать линеаризацией и естественно ожидать от анализа трансформированных изображений лучших результатов.

Приведём формулу для расчёта толщины ОК в ДСП $Y(E_{\max}, Z, \rho H, h)$

$$Y(E_{\max}, Z, \rho H, h) = -\ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h) dE}. \quad (12)$$

Экспериментальная оценка толщины ОК в ДСП находится в результате ряда последовательных действий: калибровки по «чёрному»; калибровки по «белому»; логарифмирования. Результирующее выражение имеет вид

$$\tilde{Y}(E_{\max}, Z, \rho H, h) = -\ln \frac{I_d(E_{\max}, Z, \rho H, h) - I_d(E_{\max}, Z, \infty, h)}{I_d(E_{\max}, Z, 0, h) - I_d(E_{\max}, Z, \infty, h)}. \quad (13)$$

Совместный анализ выражений (10) и (12) позволяет формализовать связь $Y(E_{\max}, Z, \rho H, h)$, кратности ослабления $M(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ и радиационной прозрачности $T(E_{\max}, Z, \rho H, h)$

$$Y(E_0, Z, \rho H, h) = \ln M(E_0, Z, \rho H, h) = -\ln T(E_0, Z, \rho H, h). \quad (14)$$

Формула (14) естественным образом используется для экспериментального определения толщины объекта в ДСП $\tilde{Y}(E_0, Z, \rho H, h)$, для чего в формуле (14) теоретические (расчётные) значения кратности ослабления или радиационной прозрачности ОК заменяются соответствующими экспериментальными значениями.

Выражение (14) позволяет сформулировать ограничение на толщину ОК в ДСП, исходя из разрядности АЦП l

$$l > \ln(M(E_{\max}, Z, \rho H, h) + 1).$$

Полученное ограничение является значимым для анализа систем ЦР, предназначенных для контроля крупногабаритных ОК, размеры которых близки к предельной проникающей способности, характерной для рассматриваемого уровня максимальных энергий рентгеновского излучения.

2.3.4. Интегральный и дифференциальный массовые коэффициенты ослабления рентгеновского излучения

Для монохроматических источников гамма-излучения закон ослабления описывается экспоненциальной функцией с параметром, зависящим от энергии излучения и материала ОК, этот параметр называют ЛКО, если толщина ОК измеряется в сантиметрах, и МКО – для массовой толщины. Для немонотонных источников гамма-излучения и рентгеновского излучения применяют некоторые аналоги ЛКО и МКО – линейные и массовые эффективные (интегральные) и средние (дифференциальные) коэффициенты ослабления рентгеновского излучения [40–42]. Интегральные и дифференциальные ЛКО и МКО помимо максимальной энергии рентгеновского излучения, и, соответственно, энергетического спектра зависят от толщины для ЛКО и массовой толщины – для МКО. При проектировании систем ЦР зачастую требуется некоторая степень универсальности, которая выражается в необходимости контролировать объекты из различных материалов. Это приводит к тому, что для анализа процессов ослабления рентгеновского излучения объектами с материалами различной плотности более востребованной характеристикой является МКО. В высокоэнергетических РРИ технически трудно реализовать принцип полного поглощения. Поэтому к понятиям интегральный МКО и дифференциальный МКО необходимо добавить определение «приборный», свидетельствующее о конкретной реализации и параметрах РРИ. Далее будут обсуждены вопросы, связанные с приборными интегральными и дифференциальными массовыми коэффициентами ослабления рентгеновского излучения – m_{int} и m_{diff} . Формулы для расчёта m_{int} и m_{diff} имеют вид

$$m_{\text{int}}(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h) = -\frac{1}{\rho H} \ln \frac{\int_0^{E_{\text{max}}} E_{\text{ab}}(E, h) f(E, E_{\text{max}}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\text{max}}} E_{\text{ab}}(E, h) f(E, E_{\text{max}}) \varepsilon(E, h) dE},$$

$$m_{\text{diff}}(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h) = \frac{\int_0^{E_{\text{max}}} m(E, Z) E_{\text{ab}}(E, h) f(E, E_{\text{max}}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_0} E_{\text{ab}}(E, h) f(E, E_{\text{max}}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}.$$
(15)

Известно выражение, которое связывает приборные интегральные и дифференциальные линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения [40]. Для МКО эта связь описывается аналогичным образом

$$m_{\text{diff}}(E_0, Z, \rho H, h) = m_{\text{int}}(E_0, Z, \rho H, h) + \rho H \frac{\partial m_{\text{int}}(E_0, Z, \rho H, h)}{\partial(\rho H)}. \quad (16)$$

Наличие выражения (16) позволяет сделать заключение о практической достаточности одного из параметров – m_{int} или m_{diff} . Заметим, что каждый из этих параметров используется для оценок своей конкретной потребительской характеристики систем ЦР и РВТ, поэтому они остаются одинаково востребованными на стадии проектирования анализируемых систем.

В результате сравнения формул (10), (12) и определений (15) можно получить описание связей кратности ослабления M и радиационной прозрачности T с m_{int} и m_{diff}

$$m_{\text{int}}(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h) = \frac{1}{\rho H} \ln M(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h) = -\frac{1}{\rho H} \ln T(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h),$$

$$m_{\text{diff}}(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h) = \frac{\frac{\partial M(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h)}{\partial(\rho H)}}{M(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h)} = -T(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h) \frac{\partial T(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h)}{\partial(\rho H)}.$$
(17)

Анализ второй формулы из (17) свидетельствует о необходимости оценки производных кратности ослабления и (или) радиационной прозрачности по массовой толщине. Естественное представление производной в виде конечной разности приводит к выводу о реализуемости упомянутого подхода

на основе экспериментально измерения кратности ослабления для ступенчатого тестового объекта.

Совместный анализ формул (12) и (15) приводит к следующему описанию связи толщин ОК в ДСП Y и интегральных и дифференциальных МКО m_{int} и m_{diff}

$$\begin{aligned} m_{\text{int}}(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h) &= \frac{Y(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h)}{\rho H}, \\ m_{\text{diff}}(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h) &= \frac{\partial Y(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h)}{\partial(\rho H)}. \end{aligned} \quad (18)$$

Формулы (18) являются по сравнению с (17) более простыми в практической реализации. Экспериментальные оценки и интегральных и дифференциальных массовых коэффициентов ослабления рентгеновского излучения $\tilde{m}_{\text{int}}(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h)$, $\tilde{m}_{\text{diff}}(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h)$ находят из измеренных значений толщины объекта контроля в длинах свободного пробега $\tilde{Y}(E_{\text{max}}, Z, \rho H, h), \rho H = \{\Delta_{\rho H}^i, i = 1..n\}$, здесь $\Delta_{\rho H}$ – высота ступени тестового объекта, n определяет диапазон изменения толщин ОК.

Интегральный и дифференциальный коэффициенты m_{int} и m_{diff} используются не только для оценки возможных потребительских характеристик проектируемых систем ЦР, но и для выбора, например, максимальных энергий рентгеновского излучения E_{max} .

2.3.5. Относительный сигнал

В техническом задании на проектирование систем ЦР в обязательном порядке указывается тип и минимальные размеры обнаруживаемого дефекта. Для унификации дефектов широко логично использовать концепцию разности толщин.

Рассмотрим объект контроля в виде плоскопараллельной пластины с массовой толщиной ρH . В качестве дефекта рассмотрим пору, вызывающую

перепад по массовой толщине $\Delta_{\rho H}$. Цифровой сигнал $S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H})$, вызванный этим дефектом, описывается выражением

$$S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H}) = I_d(E_{\max}, Z, \rho H - \Delta_{\rho H}, h) - I_d(E_{\max}, Z, \rho H, h).$$

В радиометрии и радиографии широко используется относительный сигнал $\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H})$, определяемый формулой

$$\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H}) = S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H}) / I_d(E_{\max}, Z, \rho H, h).$$

Для монохроматического источника гамма-излучения относительный сигнал, вызванный малым приращением $\Delta_{\rho H}$, совпадает с определением радиационного контраста k_X .

В соответствии с определением, введённым выше, для ИРИ приблизительная оценка относительного сигнала $\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H})$ равна

$$\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H}) = \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \left(e^{m(E, Z)\Delta_{\rho H}} - 1 \right) \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}. \quad (19)$$

Допущение малого приращения $\Delta_{\rho H}$ позволяет трансформировать формулу (19) к следующему виду

$$\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H}) \approx \Delta_{\rho H} \frac{\int_0^{E_{\max}} m(E, Z) E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}. \quad (20)$$

С учётом определения дифференциального массового коэффициента ослабления рентгеновского излучения формула (20) будет выглядеть следующим образом

$$\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H}) \approx m_{\text{diff}}(E_{\max}, Z, \rho H, h) \Delta_{\rho H}. \quad (21)$$

Формула (21) используется для расчётной оценки радиационного контраста в системах ЦР на основе источников рентгеновского излучения.

В эксперименте соответствующая оценка радиационного контраста (относительного сигнала) $\delta\tilde{S}(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H})$ представляет собой произведение $\tilde{m}_{\text{diff}}(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ на приращение массовой толщины $\Delta_{\rho H}$.

2.3.6. Относительный уровень шумов

В системах ЦР используются РРИ с двумя основными режимами регистрации – счётным и интегральным. Качество виртуальных радиографических изображений на участках, свободных от теней дефектов, определяется средними уровнями аналоговых (цифровых) сигналов и дополнительно уровнями относительных шумов. Для счётного и интегрального режима регистрации относительные уровни шумов δN и δI оцениваются по формулам

$$\delta N(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{1}{\sqrt{N(E_{\max}, Z, \rho H, h)}}, \quad \delta I(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{\eta(E_{\max}, Z, \rho H, h)}{\sqrt{N(E_{\max}, Z, \rho H, h)}}, \quad (22)$$

здесь $N(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ – число фотонов, зарегистрированных детектором; $\eta(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ – коэффициент накопления флуктуаций [33].

Число фотонов $N(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ определяется характеристиками ИРИ, РРИ и геометрической схемы контроля: интенсивностью излучения по воздуху на расстоянии 1 м для максимально возможного значения $E_{\max} - P_{0\max}$; площади фронтальной поверхности отдельного ФП; фокусного расстояния F ; времени измерения t . Выражение для оценки числа фотонов $N(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ имеет вид [32]

$$N(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{C_N P_{0\max} s t}{F^2} \frac{\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E f(E, E_{\max}) \mu_{\text{ab air}}(E) dE}. \quad (23)$$

В выражении (23) $\mu_{\text{ab air}}(E)$ – энергетическая зависимость линейного коэффициента поглощения фотонного излучения в воздухе; C_N – коэффициент

перевода интенсивности рентгеновского излучения (любой другой характеристики источника рентгеновского излучения) к размерности МэВ/(с×мм²).

Коэффициент накопления флуктуаций $\eta(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ [33] определяется средними значениями поглощённой энергии зарегистрированного фотона $\overline{E(E_{\max}, Z, \rho H, h)}$ и квадрата поглощённой энергии зарегистрированного фотона $\overline{E^2(E_{\max}, Z, \rho H, h)}$

$$\eta^2(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{\overline{E^2(E_{\max}, Z, \rho H, h)}}{\overline{E(E_{\max}, Z, \rho H, h)}^2}. \quad (24)$$

Выражения для вычисления $\overline{E(E_{\max}, Z, \rho H, h)}$ и $\overline{E^2(E_{\max}, Z, \rho H, h)}$ записываются аналогично [33]

$$\overline{E(E_{\max}, Z, \rho H, h)} = \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}, \quad (25)$$

$$\overline{E^2(E_{\max}, Z, \rho H, h)} = \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}^2(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}. \quad (26)$$

Достаточно точные аппроксимации зависимостей $\overline{E_{ab}(E, h)}$ и $\overline{E_{ab}^2(E, h)}$ приведены в статье [33] для некоторых сцинтилляционных кристаллов.

Известно, что коэффициент накопления флуктуаций для ИРИ не равен единице даже детекторов полного поглощения.

2.3.7. Отношение сигнал/шум

Отношение сигнал/шум (ОСШ) занимает особое место в измерительных системах и системах визуализации. Это связано с тем, что вероятность

обнаружения информативного сигнала (сигнала от дефекта) строго связана с уровнем ОСШ.

Отношение сигнал/шум SNR по определению вычисляется с помощью выражений (21) и (22)

$$SNR = \frac{D(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta_{\rho H})}{\delta I(E_{\max}, Z, \rho H, h)} \approx \frac{m_{\text{diff}}(E_{\max}, Z, \rho H, h) \Delta_{\rho H} \sqrt{N(E_{\max}, Z, \rho H, h)}}{\eta(E_{\max}, Z, \rho H, h)}. \quad (27)$$

Формула (27) в совокупности с (6), (15), (23), (26) позволяют определить ожидаемое значение SNR с учётом информации о параметрах ОК, ИРИ, РРИ, геометрической схемы контроля и т.п.

Подстановка (23) в (27) позволяет связать в явном виде ОСШ – SNR со временем измерения t – $SNR^2 \sim t$. Данная связь является основой для оценки времени измерения t и производительности, обеспечивающей заданный уровень ОСШ, например, $SNR=3$.

Полученная совокупность выражений позволяет обосновать техническую реализуемость задачи контроля.

Замечание. Подробную аналитическую оценку прямых и косвенных параметров систем ЦР с учётом оцифровки аналоговых сигналов сделать практически невозможно. Это связано с соответствующей погрешностью, которая имеет двойственную природу. Очевидно, что отбрасываемая часть числа (после запятой) есть случайная величина, но для оцифрованных сигналов не выполняются условия сходимости. Отсюда следует, что погрешность оцифровки не является статистической. Анализируемая погрешность не является также и однозначно систематической, так как практически не устраняется при калибровке. Разрядность АЦП существенно влияет на потребительские характеристики систем ЦР и КТ. Экспериментальная оценка степени такого влияния исключительно сложна и требует значительных материальных ресурсов. По сути дела, метод численной вариации разрядности АЦП остаётся единственным подходом, позволяющим оценить степень влияния разрядности АЦП на качество функционирования систем ЦР.

2.3.8. Оценка пространственного разрешения в цифровой радиографии

Пространственное разрешение является важнейшей потребительской характеристикой систем ЦР и РВТ. Из всех потребительских характеристик систем ЦР именно к пространственному разрешению наиболее часто выдвигаются завышенные потребительские запросы. Пространственное разрешение систем ЦР и КТ характеризует способность различать мелкие близкорасположенные структуры ОК [43–45]. Мерой ПР является минимальное расстояние между упомянутыми структурами при отдельном их восприятии. Теоретические аспекты оценки ПР систем ЦР традиционно связаны с определёнными сложностями. Экспериментальная оценка ПР применительно к системам ЦР отличается исключительной простотой и сводится к формированию цифровых радиографических изображений эталонов пространственного разрешения с последующим анализом полученных изображений. Существует несколько видов эталонов пространственного разрешения.

Существует несколько основных теоретических и теоретико-экспериментальных подходов к оценке пространственного разрешения, основанные на предварительном построении некоторых характерных функций [46–48]: функция изображения границы (ФИГ); функции рассеяния точки (ФРТ); функции передачи модуляции (ФПМ). Следует отметить, что все эти функции связаны друг с другом. Зная функцию изображения границы можно вычислить ФРТ, а затем и ФПМ. Функция рассеяния точки очень наглядна для определения пространственного разрешения σ_g .

Для введения ФРТ воспользуемся моделью точечного узкого пучка рентгеновского излучения. Функция рассеяния точки применительно к рассматриваемой задаче будет представлять собой распределение аналогового (цифрового) сигнала в изображении указанной выше точки. В классическом виде ФРТ имеет вид симметричной унимодальной функции, близкой к

распределению Гаусса. Под пространственным разрешением понимается между двумя излучающими точками, для которого изображения точек делимы друг от друга. Из определения следует, что оценка пространственного разрешения осуществляется в результате анализа двух ФРТ одной амплитуды при сближении положения их максимумов. Очевидно, что если сумма ФРТ унимодальная функция, то речи о раздельном различении изображений двух светящихся точек быть не может. Изображения точек можно разделить, если сумма ФРТ будет представлять собой бимодальную функцию. Принято считать, что изображения светящихся точек надёжно различаются, если различие между максимумом результирующего сигнала и локальным минимумом, расположенным между двумя максимумами, отличается на 20 %. Указанная цифра при анализе систем ЦР приводит к разногласиям, но может быть откорректирована.

Вид и характеристики ФРТ системы цифровой радиографии существенным образом зависят от конструкции и параметров РРИ в целом и от конструкции и параметров РЧП в частности. Причём эта частность оказывается во многих случаях главенствующей.

Сделаем одно замечание относительно предельных оценок ПР. В РРИ прямого и непрямого преобразования конечный сигнал формируется в полупроводниковом детекторе – фотоприёмнике. Каждый ФП определяет один пиксель изображения, и размеры ФП совпадают с физическими размерами пикселя. Это означает, что вне того куда светит излучающая точка – в центр ФП или на любой из его краёв – сигнал на выходе ФП один и тот же. Если пиксель имеет физические размеры $a \times a$, то собственное разрешение РЧП будет не меньше $2\sqrt{2}a$.

На величину ПР влияет ряд физических и технических факторов. Выше отмечено, что ПР зависит от обособленности эффективных объёмов РЧП. Напомним, что в эффективном объёме РЧП формируется сигнал для одного пикселя (элемента изображения). Для РРИ непрямого преобразования в РЧП

возможен обмен энергии между эффективными объёмами переносом светового излучения и ионизирующих излучений – вторичных фотонов и вторичных электронов.

Для РЧП с монокристаллическими или поликристаллическими сцинтилляционными экранами эффективные чувствительные объёмы не являются обособленными по свету и радиации [49–51]. Многоэлементные радиационно-чувствительные преобразователи РРИ непрямого преобразования отличаются обособлением элементов, как минимум, по световому излучению и, как максимум, по вторичному рентгеновскому и электронному излучению. Обособление по свету достигается покраской отдельных чувствительных элементов, а по радиации – введением ослабляющих фильтров. Увеличение значения ПР в мм по сравнению со значением $r_g = 2\sqrt{2}a$ вызывается радиационным размазыванием. Для оценки этого размазывания могут быть использованы результаты работ [33, 37] с учётом того, что закон ослабления электронного излучения является экспоненциальным [52, 53].

В расчётах ФРТ применительно к панельным и полосковым регистраторам помимо радиационного натека необходимо учитывать и степень прозрачности кристаллов к собственному излучению [54, 55].

Выше подробно рассмотрен подход к оценке ПР, основанный на концепции превращения суммы ФРТ с одинаковой амплитудой из унимодальной функции в бимодальную функцию с надёжным обнаружением положения локального минимума между максимумами бимодальной функции. Очевидно, что шумовая составляющая радиографических изображений может привести к невозможности обнаружения локального минимума. Поэтому заданный уровень различия максимумов и локального минимума суммы ФРТ в 20 % процентов должен быть повышен до необходимого уровня, позволяющего обнаружить упомянутое различие с заданной вероятностью (соответствующим значением ОСШ).

Совокупность выражений, замечаний и рекомендаций, приведённых в данном разделе, представляет собой достаточно подробную математическую модель формирования цифровых радиографических изображений. Полученная математическая модель связывает основные потребительские характеристики систем цифровой радиологии с параметрами источника и регистратора рентгеновского излучения, объекта контроля, геометрической схемы контроля и временем измерения. Полученные результаты могут быть использованы для корректного обоснования выбора параметров ЦР исходя из поставленной задачи контроля.

3. Расчёт косвенных и прямых характеристик систем цифровой радиографии резцов для горных и дорожных машин

3.1. Предварительные сведения

Рассмотрим расчёт косвенных и прямых характеристик систем цифровой радиографии вращающихся и неподвижных резцов для горных и дорожных машин. Резцы отличаются разнообразием конструкций и размеров державок и износостойких вставок.

Ограничимся типами резцов, приведённых на рисунках 1 – 3, и соответствующих вставок. В качестве материалов державок применяются, как правило, высокопрочные легированные стали, а в качестве ИСВ – износостойкие материалы. Рассмотрим классический пример представителя высокопрочных сталей – 45ХН, а пример износостойких материалов – композиция ВК8. Плотность стали 45ХН согласно марочника сталей и сплавов до 7,82 г/см³. Композиция ВК8 относится к сплавам твёрдым спечённым из порошков. Плотность материала ВК8 согласно ГОСТ 3882–74 может принимать значения от 13,9 г/см³ до 14,4 г/см³.

В таблице 2 приведён химический состав стали 45 ХН и износостойкой композиции ВК8.

Таблица 2 – Химический состав стали 45ХН и композиции ВК8

Сталь 45ХН		Композиция ВК8	
Элемент	Доля α , %	Элемент	Доля α , %
Fe	~96	W	86,36
C	0,41–0,49	C	5,64
Cr	0,45–0,75	Co	8
Ni	1–1,4		
Cu	до 0,3		
Si	0,17–0,37		
Mn	0,5–0,8		
S	до 0,035		
P	до 0,035		

Совместный анализ данных, приведённых в таблице 2, на рисунках 1–3 и в приложениях 1–3, позволяет ограничить максимальный размер износостойкой вставки пределом 22 мм, а максимальный размер державки резца – пределом в 40 мм. Массовые толщины износостойкой вставки и державки с учётом профиля изменяются в диапазоне от 0 до 32 г/см².

Рассмотрим коммерческие источники рентгеновского излучения с диапазоном максимальных энергий от 150 до 450 кэВ. В качестве РРИ используем панельный регистратор с РЧП из вольфрамата кадмия (сцинтилляционный экран CdWO₄) толщиной 0,3 мм с площадью фотоприёмника $s=0,2 \times 0,2$ мм². Разрядность АЦП $k=16$. Используем предварительный фильтр из меди ($Z_f=29$, $\rho_f=8,9$ г/см³) толщиной $h_f=2$ мм.

3.2. Расчёт косвенных параметров систем цифровой радиографии

Для иллюстрации на рисунке 4 приведены зависимости $m_{\text{int}}(\rho H)$ и $m_{\text{diff}}(\rho H)$ для ОК из стали 45ХН и из сплава ВК8 для максимальных энергий рентгеновского излучения $E_{\text{max}}=150; 250; 350; 450$ кэВ.

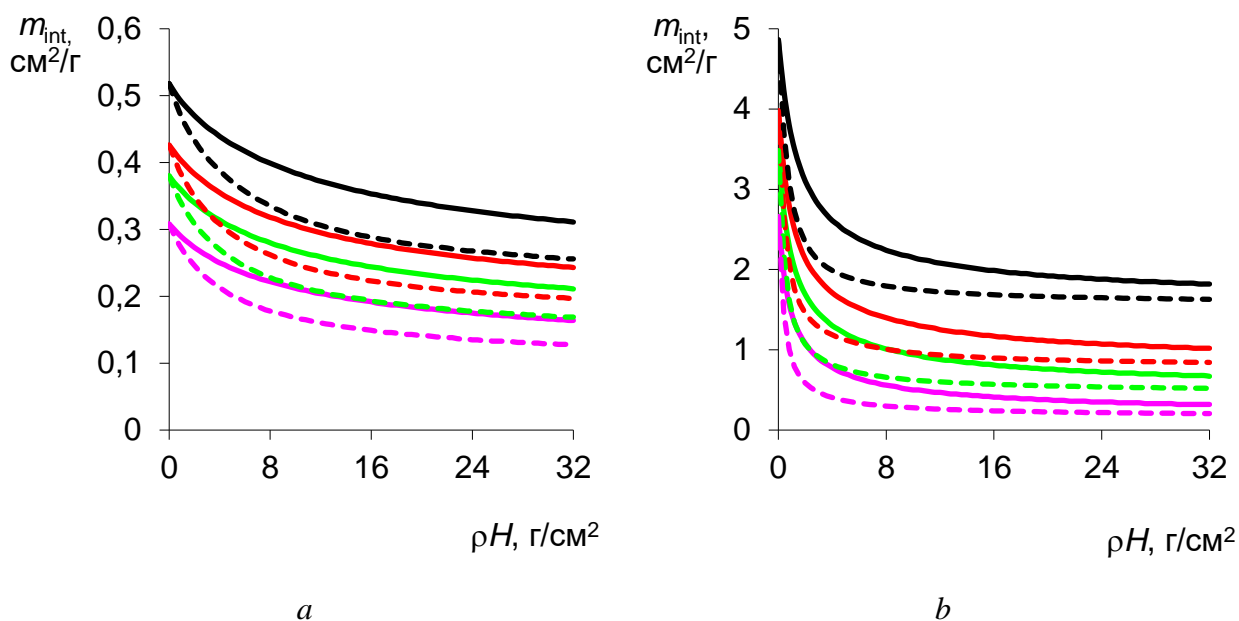


Рисунок 4 – Зависимости $m_{\text{int}}(\rho H)$ – непрерывная линия, $m_{\text{diff}}(\rho H)$ – пунктирная линия, a – 45ХН, b – ВК8: — $E_{\text{max}}=150$ кэВ; — $E_{\text{max}}=250$ кэВ; — $E_{\text{max}}=350$ кэВ; — $E_{\text{max}}=450$ кэВ

В таблицах 3, 4 приведены основные косвенные характеристики системы ЦР для стали 45ХН и сплава ВК8 для указанных выше параметров ИРИ, РРИ и ОК с шагом по массовой толщине 4 г/см² и с бесконечной разрядностью АЦП.

Таблица 3 – Косвенные характеристики системы ЦР для стали 45ХН

Характеристики	ρH , г/см ²	E_{\max} , кэВ				
		150	200	250	350	450
m_{int}	0	0,518	0,426	0,38	0,333	0,308
	4	0,439	0,355	0,314	0,272	0,25
	8	0,399	0,318	0,28	0,242	0,222
	12	0,372	0,295	0,259	0,223	0,204
	16	0,353	0,279	0,244	0,21	0,192
	20	0,339	0,267	0,233	0,2	0,182
	24	0,328	0,257	0,224	0,192	0,175
	28	0,319	0,25	0,217	0,186	0,169
	32	0,311	0,243	0,211	0,18	0,164
m_{diff}	0	0,518	0,426	0,38	0,333	0,308
	4	0,388	0,308	0,27	0,232	0,213
	8	0,335	0,262	0,228	0,195	0,178
	12	0,306	0,238	0,207	0,176	0,16
	16	0,288	0,223	0,193	0,164	0,149
	20	0,276	0,213	0,185	0,156	0,141
	24	0,268	0,206	0,178	0,15	0,135
	28	0,261	0,201	0,173	0,145	0,131
	32	0,256	0,197	0,169	0,141	0,127
ε_{int}	0	0,517	0,395	0,318	0,23	0,181
	4	0,441	0,314	0,244	0,169	0,13
	8	0,395	0,274	0,209	0,141	0,108
	12	0,367	0,25	0,188	0,125	0,095
	16	0,349	0,234	0,174	0,114	0,086
	20	0,335	0,223	0,164	0,106	0,079
	24	0,325	0,214	0,156	0,1	0,074
	28	0,317	0,207	0,149	0,094	0,07
	32	0,31	0,201	0,144	0,09	0,067
η	0	1,02	1,033	1,045	1,067	1,088
	4	1,013	1,023	1,033	1,052	1,071
	8	1,009	1,017	1,026	1,043	1,061
	12	1,007	1,014	1,021	1,037	1,054
	16	1,005	1,011	1,018	1,033	1,049
	20	1,004	1,01	1,016	1,03	1,045
	24	1,004	1,008	1,014	1,027	1,041
	28	1,003	1,008	1,013	1,025	1,038
	32	1,003	1,007	1,012	1,023	1,035

Таблица 4 – Косвенные характеристики системы ЦР для сплава ВК8

Характеристики	ρH , г/см ²	E_{\max} , кэВ				
		150	200	250	350	450
m_{int}	0	4,865	3,98	3,483	2,952	2,663
	4	2,614	1,714	1,304	0,941	0,777
	8	2,243	1,398	1,013	0,695	0,559
	12	2,08	1,254	0,884	0,588	0,466
	16	1,986	1,17	0,809	0,526	0,412
	20	1,924	1,113	0,759	0,484	0,376
	24	1,879	1,072	0,723	0,455	0,35
	28	1,845	1,041	0,696	0,432	0,331
	32	1,819	1,017	0,675	0,414	0,316
m_{diff}	0	4,863	3,978	3,481	2,95	2,661
	4	1,988	1,186	0,817	0,524	0,405
	8	1,795	1,008	0,659	0,4	0,3
	12	1,723	0,936	0,601	0,353	0,261
	16	1,686	0,898	0,57	0,327	0,24
	20	1,664	0,876	0,551	0,311	0,227
	24	1,649	0,861	0,538	0,3	0,218
	28	1,638	0,851	0,528	0,292	0,211
	32	1,629	0,843	0,52	0,285	0,206
ε_{int}	0	0,517	0,395	0,318	0,229	0,181
	4	0,286	0,18	0,125	0,079	0,06
	8	0,265	0,159	0,108	0,067	0,05
	12	0,257	0,15	0,1	0,061	0,046
	16	0,253	0,146	0,096	0,058	0,044
	20	0,25	0,143	0,094	0,056	0,042
	24	0,248	0,141	0,092	0,054	0,041
	28	0,247	0,139	0,091	0,053	0,04
	32	0,246	0,138	0,09	0,052	0,039
η	0	1,02	1,033	1,045	1,067	1,088
	4	1,002	1,004	1,007	1,015	1,025
	8	1,001	1,002	1,003	1,009	1,015
	12	1	1,001	1,002	1,006	1,011
	16	1	1,001	1,001	1,004	1,009
	20	1	1	1,001	1,003	1,007
	24	1	1	1,001	1,003	1,006
	28	1	1	1,001	1,002	1,005
	32	1	1	1,001	1,002	1,004

Очевидно, что разрядность АЦП существенным образом влияет на смещение косвенных и прямых характеристик систем ЦР. Влияние разрядности АЦП на смещение косвенных и прямых характеристик можно продемонстрировать следующим образом. Зависимость цифрового сигнала от массовой плотности $I_d(\rho H)$ для непрерывной шкалы аргумента представима ступенчатой функцией, причём цифровой единице в начале шкалы соответствует малое приращение ρH , в конце – большое приращение.

3.3. Расчёт прямых характеристик систем цифровой радиографии

Для оценок относительного сигнала и ОСШ необходимо определиться с обнаруживаемым дефектом. Дефектом будем считать уменьшение толщины ОК на 0,2 мм. Пусть на фронтальную поверхность единичного эффективного чувствительного объёма падает N_0 фотонов, например, $N_0=10^6$.

Была проведена серия расчётов прямых характеристик систем цифровой радиографии для объектов из стали 45ХН и сплава ВК8: относительного сигнала – S ; относительного уровня шумов – δI ; отношения сигнал/шум – SNR; геометрического разрешения – r_g . Результаты расчётов сведены в таблицы 5 и 6. В таблице 6 исключены большие значения уровня шумов (δI свыше 1) и малые значения ОСШ (SNR меньше 0,1).

Отметим, что пространственное разрешение оценивали для максимальной толщины ОК.

Таблица 5 – Прямые характеристики системы ЦР для стали 45ХН

Характеристики	ρH , г/см ²	E_{\max} , кэВ				
		150	200	250	350	450
S	4	0,0606	0,0478	0,0418	0,0359	0,0328
	8	0,0521	0,0404	0,0352	0,03	0,0274
	12	0,0474	0,0366	0,0318	0,027	0,0245
	16	0,0446	0,0344	0,0297	0,0252	0,0228
	20	0,043	0,0328	0,0283	0,0239	0,0216
	24	0,0413	0,0317	0,0273	0,0229	0,0207
	28	0,0403	0,0309	0,0265	0,0222	0,02
	32	0,0395	0,0302	0,0258	0,0216	0,0194
δI	4	0,0035	0,0034	0,0034	0,0037	0,0039
	8	0,0075	0,0062	0,0059	0,0059	0,0061
	12	0,0144	0,0104	0,0093	0,0088	0,0088
	16	0,0264	0,0168	0,0142	0,0126	0,0123
	20	0,0468	0,0262	0,021	0,0178	0,0168
	24	0,0813	0,0403	0,0305	0,0245	0,0226
	28	0,1387	0,0611	0,0438	0,0334	0,03
	32	0,2338	0,0917	0,0622	0,045	0,0393
SNR	4	17,17	14,1	12,13	9,78	8,41
	8	6,98	6,54	5,98	5,11	4,52
	12	3,29	3,52	3,41	3,08	2,79
	16	1,69	2,05	2,1	1,99	1,85
	20	0,92	1,25	1,35	1,35	1,28
	24	0,51	0,79	0,89	0,94	0,92
	28	0,29	0,51	0,6	0,67	0,67
	32	0,17	0,33	0,42	0,48	0,49
r_g , МКМ		568,8	569,7	571,1	571,8	572,6

Таблица 6 – Прямые характеристики системы ЦР для сплава ВК8

Характеристики	ρH , г/см ²	E_{\max} , кэВ				
		150	200	250	350	450
S	4	0,7511	0,3982	0,2607	0,1609	0,1223
	8	0,6548	0,3276	0,2037	0,1191	0,0883
	12	0,621	0,3002	0,1838	0,1042	0,0762
	16	0,6039	0,2863	0,1735	0,0962	0,0698
	20	0,5936	0,2782	0,167	0,0912	0,0657
	24	0,5868	0,2729	0,1626	0,0878	0,063
	28	0,5819	0,2692	0,1593	0,0852	0,0609
δI	32	0,5782	0,2664	0,1569	0,0833	0,0593
	4	0,3061	0,0594	0,0297	0,0171	0,0139
	8		0,5319	0,1303	0,0441	0,0291
	12			0,4639	0,0952	0,0522
	16				0,1905	0,0877
	20				0,3642	0,1416
	24				0,6762	0,223
SNR	28					0,3451
	32					0,5266
	4	2,45	6,71	8,79	9,39	8,79
	8		0,62	1,56	2,7	3,03
	12			0,4	1,09	1,46
	16			0,12	0,51	0,8
	20				0,25	0,46
24				0,13	0,28	
r_g , МКМ	28					0,18
	32					0,11
		568,8	569,7	571,1	571,8	572,6

Уширение ФРТ для рассматриваемого диапазона энергий, обусловленное переносом вторичных электронов и световых фотонов составило несколько микронов. Радиационное размазывание вторичными электронами незначительно, так как пробег вторичных электронов, образующихся в процессе взаимодействия рентгеновского излучения исследуемого диапазона, в высокоплотных материалах составляет единицы микронов. Оптическое же размазывание незначительно по причине малой толщины РОП.

Улучшение пространственного разрешения применительно к объекту контроля достигается геометрическим увеличением, то есть при фиксированном расположении ИРИ и РРИ ($F=\text{const}$) ОК смещается в сторону источника. Условие применения такого подхода связано с принадлежностью тени ОК поверхности РЧП.

4. Экспериментальная проверка методики оценки характеристик систем ЦР

4.1. Общие замечания и сводка формул для экспериментальной оценки характеристик

Реализуемая технически оценка основных прямых и косвенных характеристик систем ЦР экспериментальным путём базируется на формулах (9)–(27) и не представляет собой сложности.

Сложнейшей задачей является выделение квантовых шумов в общем потоке шумов. Указанная задача может иметь решение, если в РРИ систем ЦР и РВТ предусмотрена работа комбинированном режиме регистрации – в режиме счёта и режиме интегрального измерения. Наличие в регистраторах РЧП, близких к регистраторам полного поглощения.

В основу математической модели, рассмотренной выше, положена геометрия узкого точечного источника, не учитывающая рассеяние фотонов в объекте контроля. Традиционно влияние рассеянного излучения на качество радиографических изображений уменьшается введением в структуру системы ЦР пинхольных или щелевых коллиматоров. Наиболее эффективна коллимация источников и регистраторов рентгеновского излучения, но она практически реализуема лишь для линейных или полосковых регистраторов [56]. Для систем ЦР с панельными и матричными РРИ применение коллиматоров является трудно реализуемой задачей.

Задача оценки влияния рассеяния на качество систем ЦР и РВТ с линейными регистраторами имеет решение в том случае, если имеется возможность сравнить радиографические изображения без коллимации излучения и с коллимацией излучения. Этот подход имеет чрезвычайные материальные и временные затраты.

На практике указанная задача оценки влияния рассеяния реализуется методом Монте-Карло.

Вся совокупность выражений для оценки прямых и косвенных характеристик систем ЦР экспериментальным путём приведена в таблице 7.

Таблица 7 – Оценка параметров и характеристик систем ЦР

Характеристика	Обозначение	Вычислительная формула
Эффективность регистрации	ξ_{int}	$\frac{J_d(E_0, Z, \rho H, h) - J_d(E_0, Z, \infty, h)}{J_d(E_0, Z, \rho H, \infty) - J_d(E_0, Z, \infty, \infty)}$
Кратность ослабления для ОК	\tilde{M}	$\frac{J_d(E_0, Z, 0, h) - J_d(E_0, Z, \infty, h)}{J_d(E_0, Z, \rho H, h) - J_d(E_0, Z, \infty, h)}$
Радиационная прозрачность ОК	\tilde{T}	$\tilde{T} = \frac{1}{\tilde{M}}$
Толщина ОК в ДСП	\tilde{Y}	$\ln \tilde{M}$
Интегральный МКО	\tilde{m}_{int}	$\frac{\ln \tilde{M}}{\rho H}$
Дифференциальный МКО	\tilde{m}_{diff}	$\frac{\tilde{Y}(\rho H + \Delta) - \tilde{Y}(\rho H)}{\Delta}$
Относительный сигнал	\tilde{S}	$\frac{J_d(E_0, Z, \rho H + \Delta, h) - J_d(E_0, Z, \rho H, h)}{J_d(E_0, Z, \rho H, h) - J_d(E_0, Z, \infty, h)}$
Относительный уровень шумов	$\tilde{\delta I}$	$\frac{\sigma I_d(E_0, Z, \rho H, h)}{J_d(E_0, Z, \rho H, h) - J_d(E_0, Z, \infty, h)}$
Отношение сигнал/шум	SNR	$\frac{\tilde{S}}{\tilde{\delta I}}$

4.2. Результаты экспериментов

Предложенная совокупность формул нуждается в экспериментальной проверке. В качестве объектов контроля были выбраны медные барьеры, составленные из пластинок толщиной 1 мм. Выбор в пользу такого объекта обусловлен высоким качеством пластинок. Источник рентгеновского излучения – рентгеновский аппарат РАП 225. В экспериментальных исследованиях максимальная энергия рентгеновского излучения варьировалась в диапазоне от 100 до 225 кэВ. Силу тока поддерживали на уровне 4,3 мА. В качестве РПИ была выбрана панель Perkin Elmer XRD 1621AN/CN размером 2048×2048 пикселей с физическим размером пикселя в 200 мкм. Материалом РЧП регистратора является оксисульфид гадолиния Gd_2SO_2 плотностью 7,44 г/см³.

Толщина чувствительного слоя – 0,304 мм. Разрядность АЦП – 16 бит. Расстояние от источника излучения в эксперименте составило 1000 мм. Толщину тестового объекта варьировали от 2 до 8 мм. Время экспозиции 1 с. В качестве имитатора дефекта использовалась медная фольга толщиной 0,1 мм.

В таблице 8 приведены часть характеристик системы ЦР, которые определяются без детектора полного поглощения. Данные приведены для кратности ослабления, не превышающей или превышающей незначительно уровень 150. Красным цветом отмечены результаты экспериментов, синим – результаты расчётов.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчётных данных по кратности ослабления показал удовлетворительную сходимость результатов для небольших толщин тестового объекта. Как и ожидалось, с ростом толщины тестового объекта увеличивается влияние излучения, рассеянного в объекте, на все параметры и характеристики системы цифровой радиографии. Приборный энергетический коэффициент V_E накопления энергии, поглощённой в регистраторе, приблизительно равен отношению расчётной кратности ослабления рентгеновского излучения к соответствующей экспериментальной оценке. Погрешность определения V_E достаточна для практических оценок.

Таблица 8 – Экспериментальные оценки характеристик системы ЦР

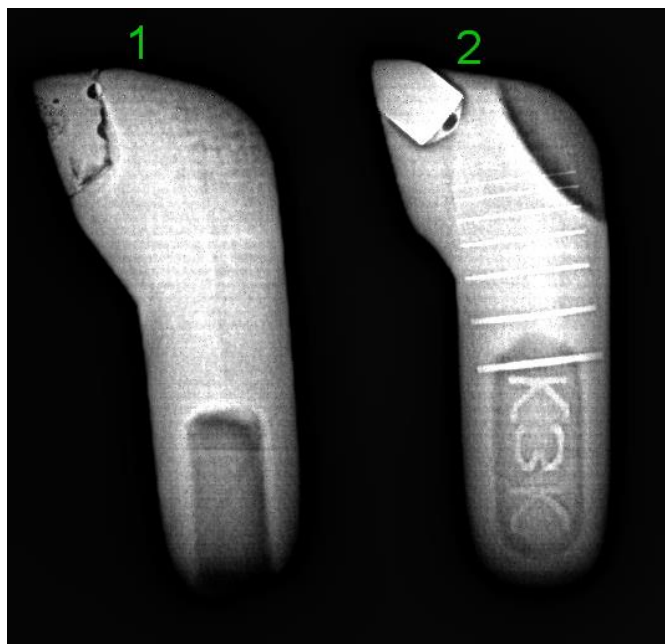
Характеристика	H , мм	E_{\max} , кэВ							
		100		140		180		220	
\tilde{M}	2	6,51	6,90	4,14	4,18	3,33	3,26	2,95	2,88
	3	12,02	15,23	6,73	7,27	4,95	5,10	4,19	4,28
	4	18,18	32,00	9,90	12,04	6,77	7,63	5,55	6,09
	5	24,14	65,05	13,97	19,24	8,81	11,05	7,02	8,42
	6	27,61	129,13	17,06	29,96	10,62	15,62	8,42	11,39
	7			20,86	45,67	12,77	21,67	9,98	15,14
	8			23,19	68,42	14,78	29,62	11,45	19,85
	\tilde{m}_{int}	2	1,05	1,155	0,80	0,802	0,68	0,662	0,61
3		0,93	1,076	0,71	0,741	0,60	0,608	0,54	0,542
4		0,81	1,02	0,64	0,697	0,54	0,569	0,48	0,506
5		0,72	0,979	0,59	0,662	0,49	0,538	0,44	0,477
6		0,62	0,946	0,53	0,635	0,44	0,513	0,40	0,454
7				0,49	0,611	0,41	0,492	0,37	0,435
8				0,44	0,591	0,38	0,474	0,34	0,418
\tilde{m}_{diff}		2	0,948	0,961	0,701	0,655	0,545	0,533	0,471
	3	0,574	0,88	0,527	0,588	0,412	0,472	0,363	0,416
	4	0,367	0,83	0,46	0,543	0,337	0,431	0,297	0,378
	5	0,161	0,795	0,248	0,509	0,23	0,4	0,223	0,349
	6	0,061	0,769	0,249	0,483	0,227	0,377	0,207	0,328
	7			0,125	0,462	0,176	0,358	0,165	0,311
	8			0,124	0,444	0,128	0,342	0,165	0,297
	\tilde{S}	2	0,085	0,082	0,063	0,056	0,049	0,046	0,042
3		0,051	0,075	0,047	0,051	0,037	0,041	0,032	0,036
4		0,033	0,071	0,041	0,047	0,03	0,038	0,026	0,033
5		0,014	0,068	0,022	0,044	0,021	0,035	0,02	0,031
6		0,005	0,066	0,022	0,042	0,02	0,033	0,019	0,029
7				0,011	0,04	0,016	0,031	0,015	0,027
8				0,011	0,039	0,011	0,03	0,015	0,026
$\tilde{\delta}I$		2	0,0197	0,02	0,0084	0,008	0,0072	0,007	0,0085
	3	0,0269	0,048	0,0256	0,014	0,0104	0,011	0,0096	0,013
	4	0,0370	0,104	0,0216	0,024	0,0169	0,017	0,0119	0,019
	5	0,0520	0,219	0,0382	0,04	0,0179	0,026	0,0143	0,026
	6	0,0613	0,446	0,0401	0,064	0,0233	0,037	0,0193	0,037
	7			0,0372	0,099	0,0254	0,052	0,0232	0,05
	8			0,0569	0,15	0,0357	0,073	0,0269	0,067
	SNR	2	4,3	4,1	7,5	7,0	6,8	6,6	4,9
3		1,9	1,6	1,8	3,6	3,6	3,7	3,3	2,8
4		0,9	0,7	1,9	2,0	1,8	2,2	2,2	1,7
5		0,3	0,3	0,6	1,1	1,2	1,3	1,4	1,2
6		0,1	0,1	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	0,8
7				0,3	0,4	0,6	0,6	0,6	0,5
8				0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,4

5. Цифровая радиография резцов: эксперименты и выводы

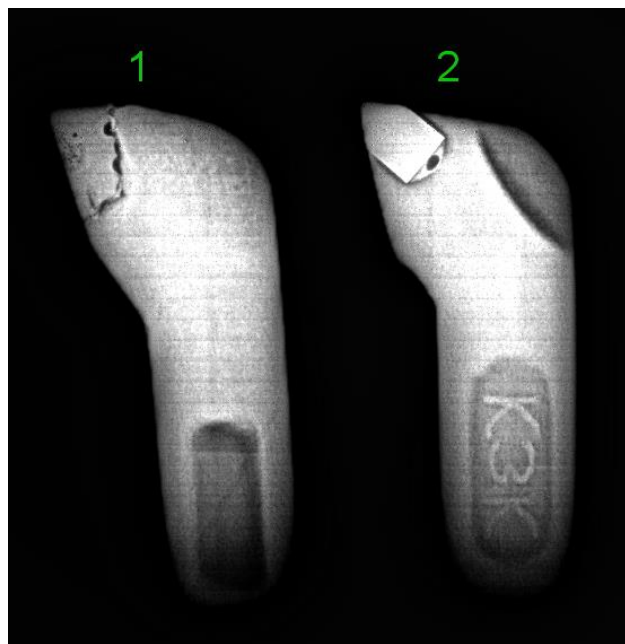
Для подтверждения возможности применения метода цифровой радиографии для контроля вращающихся и неподвижных резцов была проведена серия экспериментов.

Цифровые радиографические изображения резцов формировались системой ЦР, состоящей из рентгеновского аппарата РАП 225, панели Perkin Elmer XRD 1621AN/CN. Фокусное расстояние составило 1,5 метра.

На рисунках 5, 6, 7 приведены типичные радиографические изображения вращающихся и неподвижных резцов с эталонами чувствительности двух типов для разных экспозиций. Ряд изображений приведён в позитиве, а ряд в негативе, что связано с решаемой задачей (дефектоскопия, оценка чувствительности метода и т.п.).



1000мс 50 кадров 200 кэВ



1000мс 50 кадров 180 кэВ

Рисунок 5 – Цифровые изображения резцов

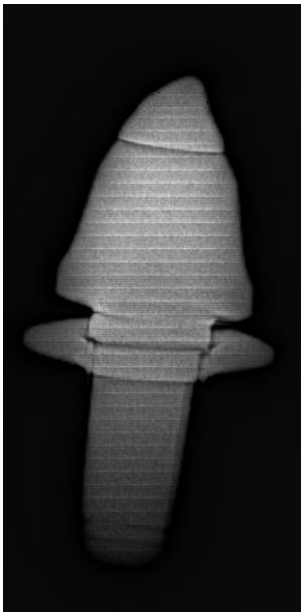


1000 мс 50 кадров 190 кэВ

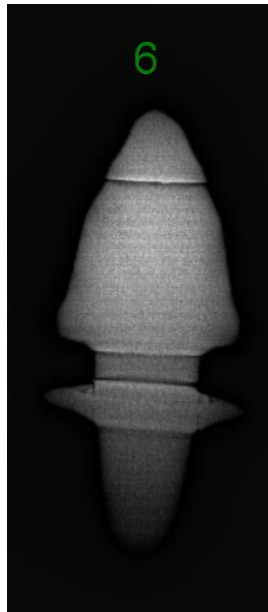


1000 мс 50 кадров 210 кэВ

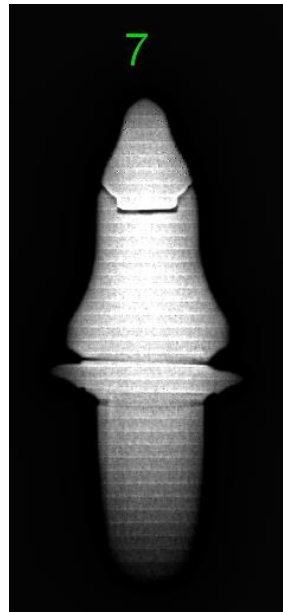
Рисунок 6 – Цифровые изображения резцов



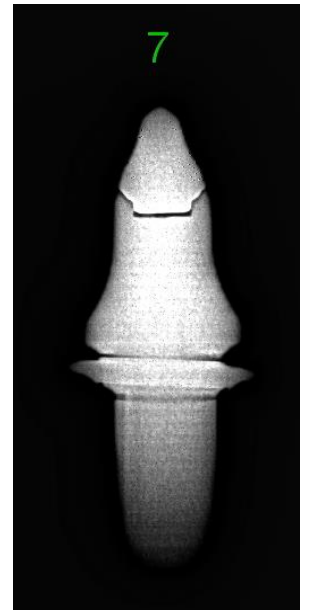
1000 мс 10 кадров
210 кэВ



1000 мс 50 кадров
210 кэВ



1000 мс 10 кадров
210 кэВ



1000 мс 50 кадров
210 кэВ

Рисунок 7 – Цифровые изображения резцов

Из анализа рисунков 5–7 можно сделать вывод о применимости методов цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии для контроля вращающихся и неподвижных резцов горных и дорожных машин. В

пользу этого свидетельствует высокая точность оценки формы резцов и их износостойкой вставки. На радиографическом изображении резца, представленного на рисунке 6 (5), выделяются недостатки качества литья державки. Вероятнее всего, указанные недостатки приведут к увеличению трения горной или грунтовой среды по боковой поверхности резца, что приведёт к увеличению тягового усилия и неравномерности его распределения по совокупности резцов. На рисунках 5 (1) и 5 (2) следует отметить дефект, проявившийся в виде недостаточно высокого качества соединения износостойкой пластины и тела резца (особо заметен на 5 (2)), что приведёт к преждевременному критическому отказу резца при эксплуатации и, возможно, рабочего органа. На рисунке 6 (3, 4) легко заметить дефект в виде локального отсутствия паяного соединения, размер изображения тени дефекта приблизительно 4×4 мм². Эксплуатация такого резца однозначно приведёт к его отказу, причём по различным сценариям. В первом сценарии дефектная область выступит началом развития трещины с последующим отрывом ИСВ и потерей резцом режущей способности. Во втором сценарии выполнение резцом функциональных назначений приведёт к его нагреву, расширению воздуха во внутренней полости и критическому отказу резца с последствиями, описанными выше. Для вращающегося резца, радиографическое изображение которого приведено на рисунке 7 (6) следует отметить неравномерность паяного соединения ИСВ и тела резца. Возможно, что такой недостаток и не является дефектом, и не приведёт к катастрофическому отказу РО, но использовать такой резец в рабочих органах горных и дорожных машин ответственного назначения нельзя, в связи с повышением риска отказа. Разумеется, на настоящий момент времени применение методов РВТ для тотального контроля резцов нельзя считать обоснованным. Использование же РВТ для совершенствования технологий изготовления резцов является необходимым, прежде всего с экономической точки зрения. Это обусловлено тем, что применение высококачественных резцов в горных и дорожных

машинах существенно снижает экономические риски и их краткосрочные и долгосрочные последствия, вызванные критическими отказами резцов и рабочих органов анализируемых машин и оборудования при их эксплуатации в экстремальных условиях. Отметим, что большая часть территории Российской Федерации характеризуется экстремальными условиями эксплуатации горных и дорожных машин.

6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Технологий QuaD

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

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

1. Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность;
- правовая защищенность.

2. Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;

– уровень материалоемкости разработки.

Для сравнения конкурентоспособности выбрана цифровая радиография. Выбранные показатели для оценки конкурентоспособности метода показаны в таблице 9.

Таблица 9 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производственной безопасности	0,25	90	100	0,9	0,225
2. Повышение производительности труда	0,2	90	100	0,9	0,18
3. Простота эксплуатации	0,05	50	100	0,5	0,025
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
4. Конкурентоспособность	0,2	80	100	0,8	0,16
5. Цена	0,1	50	100	0,5	0,05
6. Финансовая эффективность научной разработки	0,2	90	100	0,9	0,18
Итого	1				

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i, \quad (27)$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

$$P_{cp} = 0.25 \cdot 90 + 0.2 \cdot 90 + 0.05 \cdot 50 + 0.2 \cdot 80 + 0.1 \cdot 50 + 0.2 \cdot 90 = 82$$

Показатель P_{cp} равный 82 говорит о перспективности продукта.

6.2. 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.

1. 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.

Сильные стороны– это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован.

Слабые стороны. Слабость – недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, препятствующие достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

В таблице 10 представлен результат первой ступени в матричной форме.

Таблица 10 – Матрица SWOT

	<u>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</u>	<u>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</u>
	С1. Наличие опытного руководителя. С2. Наличие необходимого оборудования для испытаний С3. Экономическая эффективность разработки. С4. Наличие бюджетного финансирования. С5. Отсутствие аналогичных разработок	<u>Сл1. Отсутствие средств для изготовления изделия согласно научной разработке.</u> <u>Сл2. Присутствие альтернативных способов улучшения характеристик оборудования</u> <u>Сл3. Медленный процесс вывода на рынок.</u>
<u>Возможности:</u> <u>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</u> <u>В2. Появление дополнительного спроса на новую технологию.</u> <u>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.</u>		
<u>Угрозы:</u> <u>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</u> <u>У2. Развитая конкуренция технологий производства.</u> <u>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</u>		

2. Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды.

Результаты, представленные в табличной форме (табл.11 – табл.14), призваны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. Каждый символ в таблице обозначает степень соответствия.

Таблица 11 – Интерактивная матрица проекта (1)

Сильные стороны проекта

		C1	C2	C3	C4	C5
Возможности проекта	B1	+	+	+	-	-
	B2	0	+	-	-	-
	B3	+	0	+	0	-

Таблица 12 – Интерактивная матрица проекта (2)

		Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2	Сл3
Возможности проекта	B1	+	+	0
	B2	+	-	+
	B3	-	+	0

Таблица 13 – Интерактивная матрица проекта (3)

		Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4	C5
Угрозы проекта	У1	+	0	+	-	0
	У2	-	+	+	-	-
	У3	-	-	0	+	-

Таблица 14 – Интерактивная матрица проекта (4)

		Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2	Сл3
Угрозы проекта	У1	0	+	0
	У2	+	0	-
	У3	+	0	+

Анализ интерактивных таблиц представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и т.д. следующего вида: B1C1C2C5; B4C1C4. Каждая из записей представляет собой направление реализации проекта.

В случае, когда две возможности сильно коррелируют с одними и теми же сильными сторонами, с большой вероятностью можно говорить об их единой природе. В этом случае, возможности описываются следующим образом: B2B3C2C3.

В результате получаем сильно коррелирующие параметры:

- 1) B1C3C4C5, B2C2C3, B3C1C3 => B1B2C3, B2B3C3, B1B3C3
- 2) B1Сл2, B2Сл1Сл3, B3Сл1Сл3 => B2B3Сл1Сл2
- 3) У1C1C2C3, У2C1C2C3, У3C4 => У1У3C1C2C3
- 4) У2Сл1Сл3, У3Сл3 => У2У3Сл3

Исходя из этих данных, получаем наиболее выгодные направления реализации проекта.

3. Составим итоговую матрицу (табл.15) для заключительного третьего этапа, в котором будут описаны основные решения научно-исследовательского проекта.

Таблица 15 – Итоговая матрица SWOT

	<u>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</u> С1. Наличие опытного руководителя. С2. Наличие необходимого оборудования для испытаний С3. Экономическая эффективность разработки. С4. Наличие бюджетного финансирования. С5. Отсутствие аналогичных разработок	<u>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</u> <u>Сл1. Отсутствие средств для изготовления изделия согласно научной разработке.</u> <u>Сл2. Присутствие альтернативных способов улучшения характеристик оборудования</u> <u>Сл3. Медленный процесс вывода на рынок.</u>
<u>Возможности:</u> <u>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</u> <u>В2. Появление дополнительного спроса на новую технологию.</u> <u>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.</u>	<u>V1V2C3, V2V3C3, V1V3C3</u>	<u>V2V3Cл1Cл2</u>
<u>Угрозы:</u> <u>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</u> <u>У2. Развитая конкуренция технологий производства.</u> <u>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</u>	<u>U1U2C1C2C3C5</u>	<u>U2У3Cл3</u>

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

6.3. Планирование научно-исследовательских работ

6.3.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

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

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в табл. 16.

Таблица 16 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

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

6.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ

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

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

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (28)$$

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (29)$$

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

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

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

6.3.3. Разработка графика проведения научного исследования

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

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (30)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} (1,48) = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (31)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году (365);

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году (111);

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году (8).

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округляем до целого числа. Все рассчитанные значения сводим в таблицу (табл. 17).

Таблица 17 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}			Длительность работ в календарных днях, T_{ki}		
	t_{min} , чел-дни			t_{max} , чел-дни			$t_{ож}$, чел-дни				Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3							
Составление и утверждение технического задания	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Руководитель	3	3	3	5	5	5
Подбор и изучение материалов по теме	6	6	6	13	13	13	8,8	8,8	8,8	Студент	9	9	9	14	14	14
Выбор направления исследований	3	3	3	7	7	7	4,6	4,6	4,6	Руководитель	5	5	5	8	8	8
Календарное планирование работ по теме	2	2	2	6	6	6	3,6	3,6	3,6	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Подготовка образцов для экспериментов	3	5	8	10	10	15	5,8	7	10,8	Студент	3	4	6	5	6	9
Проведение экспериментов	7	10	16	12	17	28	9	12,8	20,8	Студент	5	7	11	8	10	17
Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	9	10	7	12	14	13	10,2	11,6	9,4	Студент.	6	6	5	9	9	8
Составление пояснительной записки	11	16	20	17	25	30	13,4	19,6	24	Руководитель, студент	5	7	8	7	9	14

На основе таблицы 18 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени, отведённый на написания ВКР. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 18 – Календарный план график проведения НИР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дни	Продолжительность выполнения работ											
				Фев.		Март			Апрель			Май			
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление ТЗ	Руководитель	5	■											
2	Изучение материалов	Студент	14		▬										
3	Выбор направления	Руководитель	8			■									
4	Планирование работ	Руководитель.	3				■								
5	Подготовка образцов	Студент	9				▬								
6	Проведение экспериментов	Студент	17					▬							
7	Расшифровка данных	Студент	9							▬					
8	Пояснительная записка	Руководитель, студент	14									▬			

■ - руководитель; ▬ - студент.

6.4. Бюджет научно-технического исследования

6.4.1. Расчет материальных затрат НТИ

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

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

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

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

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

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (32)$$

где k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы;

m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

$N_{расхи}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.).

Величина коэффициента (k_T), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах от 15 до 25 процентов от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносим в таблицу 19.

Таблица 19 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы (Z_M), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	лист	60	80	70	1	0,9	1,5	60	72	105
Картридж для принтера	шт.	1	1	1	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Итого								1060	1072	1105

6.4.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

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

Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Расчет затрат по данной статье заносится в таблицу 20. При приобретении спецоборудования

необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 процентов от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Таблица 20 – Расчет бюджета затрат на приобретение оборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Количество единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Источник ионизирующего излучения	1	1	1	1000	800	1400	1000	800	1400
2	Детектор	1	1	1	8500	8000	9000	8500	8000	9000
Итого								9500	8800	10300

6.4.3. Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере от 20 до 30 процентов от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл. 21.

Таблица 21 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.			Зарплата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.		
			Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2,2	2,2	2,2	1,5	1,5	1,5	3,3	3,3	3,3
2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	8,8	8,8	8,8	0,25	0,25	0,25	2,2	2,2	2,2
3	Выбор направления исследований	Руководитель	4,6	4,6	4,6	1,5	1,5	1,5	6,9	6,9	6,9
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	3,6	3,6	3,6	2,1	2,1	2,1	7,7	7,7	7,7
5	Подготовка образцов для экспериментов	Студент	5,8	7	10,8	0,88	0,88	0,88	5,1	6,2	9,5
6	Проведение экспериментов	Студент	9	12,8	20,8	-	-	-	-	-	-
7	Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	Студент	10,2	11,6	9,4	0,88	0,88	0,88	9	10,2	8,3
8	Составление пояснительной записки	Руководитель, студент	13,4	19,6	24	2,38	2,38	2,38	31,9	46,7	57,1
Итого									66,1	83,1	95

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (33)$$

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (от 12 до 20 процентов от $Z_{\text{осн}}$).

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

$$Z_{\text{осн}} = T_p \cdot Z_{\text{дн}}, \quad (34)$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (35)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 22 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: выходные, праздничные	119	119
Потери рабочего времени: отпуск, невыходы по болезни	48	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	198	198

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (36)$$

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

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

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

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

Таблица 23 – расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, тыс. руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , тыс. руб.	$Z_{дп}$, тыс. руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, тыс. руб.
Руководитель	32,015	0,3	0,3	1,3	149,83	7,869	18	78,91
Студент	5,708	0	0	1,3	7,42	0,44	28	12,32
Итого $Z_{осн}$								91,23

6.4.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (37)$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Таблица 24 – отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руководитель	78,91	78,91	78,91
Студент	12,32	12,32	12,32
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271		
Итого			
Исполнение 1	24,72		
Исполнение 2	24,72		
Исполнение 3	24,72		

6.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

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

Таблица 25 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	
1. Материальные затраты НТИ	1060	1072	1105	
2. Затраты на спецоборудование для научных работ	9500000	8800000	10300000	
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	136770	146310	153970	
4. Отчисления во внебюджетные фонды	37060	39650	41730	
5. Накладные расходы	1547982,4	1437925,12	1679488,8	16% от суммы ст.1-5
6. Бюджет затрат НТИ	11222872,4	10424957,12	12176293,8	Сумма ст. 1-5

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

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (38)$$

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

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

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

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (39)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

Таблица 26 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1. Повышение производственной безопасности	0,25	5	5	5
2. Повышение производительности труда	0,2	5	5	5
3. Простота эксплуатации	0,05	5	5	5
4. Конкурентоспособность	0,2	5	5	5
5. Цена	0,1	5	5	5
6. Финансовая эффективность научной разработки	0,2	3	2	1
Итого	1			

$$I_{p1} = 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,2 = 4,6$$

$$I_{p2} = 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,2 = 4,55$$

$$I_{p3} = 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,2 = 4,5$$

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

$$I_{исп1} = \frac{I_{p1}}{I_{финр1}}, I_{исп2} = \frac{I_{p2}}{I_{финр2}} \text{ и т.д.} \quad (40)$$

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

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}} \quad (41)$$

Таблица 27 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,947	0,965	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	4,55	4,5
3	Интегральный показатель эффективности	4,75	4,4	4,35
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,08/1,06	0,93/0,98	0,95/1,02

Проведя расчет энерго- и ресурсоэффективности и сравнив различные исполнения приходим к выводу, что исполнение № 1 является наилучшим вариантом.

7. Профессиональная социальная ответственность

Объектом исследования данной работы является система цифровой радиографии резцов горных и дорожных машин. Далее в таблице 28 приведены опасные факторы, возникающие в процессе работы.

Таблица 28 – опасные и вредные факторы возникающие при выполнении работ по математической коррекции апертурных искажений при получении массива экспериментальных данных.

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работы по получению изображения: 1) Установка оборудования; 2) Подключение оборудования к питающей сети; 3) Экспозиция;	1.Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне;	1.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; 2.Повышенный уровень статического электричества	1)СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)" 2)ГОСТ Р 12.1.019-2009
Работы по обработке полученной информации: 1) работа за персональным компьютером;	1.Физические статические перегрузки; 2.Умственное перенапряжение; 3.Повышенный уровень электромагнитного излучения 4.Недостаточное освещение рабочей зоны 5.Отклонение показаний микроклимата	1. Электрический ток	СанПиН 2.2.4/2.1.8.562-96 СанПиН 2.2.4.1191-03 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03

В одной из частей работы используется источник ионизирующего излучения. Этим источником является рентген аппарат, который в свою очередь относится к электроустановкам. Проведение работ на электроустановках осуществляется в строгом соответствии с «Правилами технической

эксплуатации электроустановок потребителей», «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилами техники безопасности и производственной санитарии в электронной промышленности». Последние учитывают особенности отрасли и специфику радиоэлектронного оборудования. Все вышеуказанные «Правила» распространяются на работы с действующими электроустановками и радиоэлектронным оборудованием. Персоналу работающему с электроустановками до 1000 В должен быть присвоен I квалификационная группа допуска к эксплуатации электроустановок. Всё используемое оборудование должно быть исправно и заземлено. Помещения, где размещаются рабочие места с ПЭВМ, должны быть оборудованы защитным заземлением (занулением) в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации.

Не следует размещать рабочие места с ПЭВМ вблизи силовых кабелей и вводов, высоковольтных трансформаторов, технологического оборудования, создающего помехи в работе ПЭВМ.

При работе с источниками ионизирующих излучений необходимо соблюдать нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. В свою очередь необходимо обеспечить радиационную защиту персонала в виде толстых стен и дверей. Также опасность могут представлять озон и окислы азота, образующиеся в результате радиолиза воздуха под действием рентгеновского излучения. По этой причине рабочее помещение должно быть оборудовано вытяжкой. Для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

- не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);
- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учётом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа

облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

В данном случае персонал относится к группе А и предел получаемой дозы составляет 20 мЗв в год.[СанПиН 2.6.1.2523-09 НРБ 99/2009]

Превышение дозы радиации может привести к угнетению иммунной системы организма и сделать его восприимчивым к различным заболеваниям. При облучении повышается также вероятность появления злокачественных опухолей.

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

Работая при освещении плохого качества или низких уровней, люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, что приводит к снижению работоспособности. В ряде случаев это может привести к головным болям. Причиной во многих случаях являются слишком низкие уровни освещенности, слепящее действие источников света и соотношение яркостей. Головные боли также могут быть вызваны пульсацией освещения. Таким образом, становится очевидно, что неправильное освещение представляет значительную угрозу для здоровья

Расположение рабочих мест за мониторами для пользователей в подвальных помещениях не допускается. Площадь на одно рабочее место с компьютером для пользователей должна составлять не менее 4,5 м². Помещения с компьютерами должны оборудоваться системами отопления, кондиционирования воздуха или эффективной приточно-вытяжной вентиляцией. Для внутренней отделки интерьера помещений с компьютерами должны использоваться диффузно-отражающие материалы с коэффициентом

отражения для потолка – 0,7–0,8; для стен – 0,5–0,6; для пола – 0,3–0,5. Поверхность пола в помещениях эксплуатации компьютеров должна быть ровной, без выбоин, нескользкой, удобной для очистки и влажной уборки, обладать антистатическими свойствами. В помещении должны находиться аптечка первой медицинской помощи, углекислотный огнетушитель для тушения пожара.

Мероприятия по доведению микроклиматических показателей до нормативных значений включаются в комплексные планы предприятий по охране труда. Для создания благоприятных условий работы, соответствующих физиологическим потребностям человеческого организма, санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения. Рабочая зона ограничивается высотой 2,2 м над уровнем пола, где находится рабочее место. При этом нормируются: температура, относительная влажность и скорость движения воздуха (СанПиН 2.2.4.548 – 96).

Неблагоприятные значения микроклиматических показателей могут стать причиной снижения производственных показателей в работе, привести к таким заболеваниям работающих как различные формы простуды, радикулит, хронический бронхит, тонзиллит и др.

Контроль электромагнитной обстановки на рабочих местах пользователей ПЭВМ производится органами ГСЭН и (или) испытательными лабораториями (центрами), аккредитованными в установленном порядке. Измерение электромагнитных параметров должны проводиться в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и соответствовать допустимым уровням. Напряженность электрического поля менее 25 В/м; плотность магнитного потока менее 250 нТл. Биологический эффект ЭМП в условиях длительного многолетнего воздействия накапливается, в результате возможно развитие отдаленных последствий, включая дегенеративные процессы центральной нервной системы, рак крови (лейкозы), опухоли мозга, гормональные заболевания.

Режим труда и отдыха предусматривает соблюдение определенной длительности непрерывной работы на ПК и перерывов, регламентированных с учетом продолжительности рабочей смены, видов и категории трудовой деятельности. В данном случае персонал относится к группе В2 (время работы до четырёх часов). Продолжительность непрерывной работы на ПК без регламентированного перерыва не должна превышать 2 часа.

7.2. Экологическая безопасность

Рентген аппараты имеют определенный ресурс работы, после его израсходования аппарат необходимо утилизировать в соответствии с ГОСТ Р 53692-2009. Для утилизации необходимо обратиться в специализированную организацию, которая имеет лицензию от Роспотребнадзора на осуществление данной деятельности. Наличие ионизирующего излучения не будет влиять на окружающую среду, т.к. предполагается что работы проводятся в лабораторных условиях с обеспечением необходимой радиационной защиты.

7.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

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

В случае поражения током следует освободить пострадавшего от действия электрического тока, то есть отключить цепь тока, выключить

рубильник и т.д. В случае отдаленности выключателя от места происшествия, следует перерезать провода или отбросить сухой палкой оборвавшийся конец провода.

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

7.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К работе с источниками ионизирующих излучений допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие противопоказаний по здоровью, прошедшие инструктаж по технике безопасности, пожарной безопасности и радиационной безопасности. Работа с ИИИ производится в специально оснащённом помещении.

Продолжительность непрерывной работы за компьютером без регламентированного перерыва не должна превышать 2 часов. Рекомендуется делать перерывы в работе за ПК продолжительностью 10 минут через каждые 50 минут работы. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600..700 мм, но не ближе 500. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100..300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной поверхности, отделенной от основной столешницы. В помещениях должна проводиться ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы. Шумящее оборудование (печатающие устройства, сканеры, серверы и тому подобные), уровни шума которого превышают нормативные, должно размещаться вне рабочих мест сотрудников.

Заключение

В диссертационной работе приведена математическая модель систем цифровой радиографии, которая связывает основные и косвенные характеристики с параметрами источника и регистратора рентгеновского излучения, объекта контроля, геометрической схемы формирования радиографических изображений, со временем измерений. К основным потребительским характеристикам относятся радиационный контраст, пространственное разрешение, время контроля, обеспечивающее заданный уровень отношения сигнал/шум для обнаружения дефекта заданных размеров. Косвенные характеристики систем цифровой радиографии используются для оценки эффективности составляющих анализируемых систем. Выделяют следующие косвенные характеристики: интегральную эффективность регистрации; кратность ослабления рентгеновского излучения объектом контроля; радиационную прозрачность объекта контроля; толщину объекта в длинах свободного пробега; уровни сигналов, вызванных появлением сигналов; уровни шумов. Предложен подход для оценки влияния рассеяния на смещение характеристик систем цифровой радиографии. Сопоставление примеров расчёта и результаты экспериментальных исследований доказывают адекватность разработанной модели и её применимость для обоснования возможности радиографического контроля резцов горных и дорожных машин. Экспериментально показана эффективность применения цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии применительно к контролю вращающихся и неподвижных резцов горных и дорожных машин. Сформулирован ряд рекомендаций по повышению эффективности радиографического контроля анализируемых объектов контроля.

Список использованных источников

1. Крестовоздвиженский П.Д., Клишин В.И., Никитенко С.М., Герике П. Б. Выбор формы армирующих вставок для тангенциальных поворотных резцов горных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 6. – С. 107–115.
2. Производство и эксплуатация разрушающего инструмента горных машин: монография / А.А. Хорешок, М.Е. Маметьев, А.М. Цехини др. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. – 296 с.
3. ГОСТ Р 51047-97. Резцы для очистных и проходческих комбайнов. Общие технические условия.
4. Копейский машзавод. www.kopemash.ru/products/1/1138.html.
5. Volk H.J. Wirtgen drives the development of surface mining // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 138. – P. 30–39.
6. Iovanas D M., Dumitrascu A.E. Reliability estimation of the milling machines teeth obtained by welding deposition process // *MATEC Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 121. – No. article 02003.
7. Резцы с круглым стержнем. http://tbau.ru/info/wirtgen_generation_x.pdf
8. ВЕТЕК GmbH & Co. KG. http://knoedlseder.com/images/downloads_en/pdf/Be_Katalog-Grabenfr_2013_engl_rz_klein.pdf
9. Горшков Л. К., Суманеев Н. Н., Сенькин Г. А. Оценка возможности армирования бурового инструмента синтетическими сверхтвердыми материалами в стандартных связках-матрицах // *Записки Горного института*. – 1973. – Т. 66. – № 1. – С. 102–108.
10. Рева В.П., Онищенко Д.В., Петров В.В., Ким В.А., Евстигнеев А.И. Формирование твердого сплава ВК8 с использованием порошка карбида вольфрама, синтезированного по механохимической технологии // *Новые огнеупоры*. – Vol. 1. – № 7. – С. 39–43.
11. Захаров Д.А., Амосов А.П., Сальников А.В., Сальников М.А. О буровых твердых сплавах на основе высокотемпературных карбидов вольфрама

// Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 1. – С. 29–34.

12. Ковалев В.А., Хорешок А.А., Герике Б.Л., Кузнецов В.В., Мухортиков С.Г., Дрозденко Ю.В. Эксплуатация проходческих комбайнов на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 26–33.

13. Чумичев, А. М. Техника и технология неразрушающих методов контроля деталей горных машин и оборудования. – Москва: Московский государственный горный университет, 2003. – 380 с.

14. Репин О.С. Оптический метод и средства автоматизированного неразрушающего контроля деталей в машиностроении // Дисс. на соискание уч. степени к.т.н. – Санкт-Петербург: Национальный минерально–сырьевой университет «Горный», 2015. – 191 с.

15. Дорошев Ю.С., Нестругин С.В. Прогрессивные технологии технического обслуживания вращающегося оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 2-1. – С. 256–261.

16. Li Z., Ge S., Zhu H. Key issues in the wear fault monitoring and diagnosis for critical components of coal cutters under deep coal seam // Tribology. – 2014. – Vol. 34. – P. 729–730.

17. Rusiński E., Czmochowski J., Moczko P., Pietrusiak D. Surface mining machines: problems of maintenance and modernization. – Springer, 2017. – 169 p.

18. Майоров А. А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле // Сфера нефтегаз. – 2009. – № 9. – С. 26–37.

19. Martz H.E., Logan C.M., Schneberk D.J., Shull P.J. X-ray Imaging: fundamentals, industrial techniques and applications. – CRC Press, 2016. – 555 p.

20. Ewert U., Zscherpel U. Minimum requirements for digital radiography equipment and measurement procedures by different industries and standard organizations // 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic. – 2014. – P. 6-10.

21. Heindel T.J. A review of X-ray flow visualization with applications to multiphase flows // *Journal of Fluids Engineering*. – 2011. – Vol. 133. – no. 7. – P. 074001–1–074001–16.
22. Ewert U., Zscherpel U., Heyne K., Jechow M., Bavendiek K. Image quality in digital industrial radiography // *Materials Evaluation* – 2012. – Vol. 70. – no. 8. – P. 955–964.
23. Kolkoori S., Wrobel N., Osterloh K., Redmer B., Deresch A., Ewert U. High energy radiography for detecting details in highly complex packings // *MP Materials Testing*. – 2013. – Vol. 55. – no. 9. – P. 683–688.
24. Schlüter S., Sheppard A., Brown K., Wildenschild D. Image processing of multiphase images obtained via X-ray microtomography: a review // *Water Resources Research*. – 2014. – Vol. 50. – no. 4. – P. 3615–3639.
25. De Chiffre L., Carmignato S., Kruth J. P., Schmitt R., Weckenmann A. Industrial applications of computed tomography // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 63. – no. 2. – P. 655–677.
26. Oliveira J., Martins P.M., Martins P., Correia V., Rocha J.G., Lanceros-Mendez, S. Gd₂O₃: Eu³⁺/PPO/POPOP/PS composites for digital imaging radiation detectors // *Applied Physics A*. – 2015. – Vol. 121. – no. 2. – P. 581–587.
27. Awadalla S. (ed.). *Solid-state radiation detectors: technology and applications*. – Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2015. – 393 p.
28. Espes E., Andersson T., Björnsson F., Gratorp C., Hansson B.A.M., Hemberg O., Johansson G., Kronstedt J., Otendal M., Tuohimaa T., Takman P. Liquid-metal-jet X-ray tube technology and tomography applications // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. – 2014. – Vol. 9212. – art. no. 92120J. – 6 p.
29. Clausnitzer V., Hopmans J.W. Pore-scale measurements of solute breakthrough using microfocus X-ray computed tomography // *Water Resources Research*. – 2000. – Vol. 36. – no. 8. – P. 2067–2079.

30. Kieffer J.C., Krol A., Jiang Z., Chamberlain C.C., Scalzetti E., Ichalalene Z. Future of laser-based X-ray sources for medical imaging // *Applied Physics B*. – 2002. – Vol. 74. – no. 1. – P. s75–s81.
31. Капустин В.И., Осипов С.П. О критериях сравнения различных модификаций методов цифровой радиографии // *Контроль. Диагностика*. – 2013. – № 12. – С. 25–32.
32. 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.
33. Zav'yalkin F.M., Osipov S.P. Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions // *Soviet Atomic Energy*. – 1985. – Vol. 59. – no. 4. – P. 842–846.
34. Schiff L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // *Physical review*. – 1951. – Vol. 83. – P. 252–253.
35. Ali E.S.M., Rogers D.W.O. Functional forms for photon spectra of clinical linacs // *Physics in medicine and biology*. – 2011. – Vol. 57. – P. 31–50.
36. Gamma data for elements. <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/gdfe.php>
37. Zav'yalkin F.M., Osipov S.P. Calculation of the scattering function of a multichannel scintillation detector used to record high-energy photon radiation // *Soviet Atomic Energy*. – 1986. – Vol. 60. – no. 2. – P. 186–188.
38. Aichinger H., Dierker J., Joite-Barfuß S., Säbel M. Image quality and dose // *Radiation exposure and image quality in X-ray diagnostic radiology*. – Springer Berlin Heidelberg, 2012. – P. 85–101.
39. Park H.S., Hansson R.C., Sehgal B.R. Fine fragmentation of molten droplet in highly subcooled water due to vapor explosion observed by X-ray radiography // *Experimental thermal and fluid science*. – 2005. – Vol. 29. – no. 3. – P. 351–361.
40. Nedavnii O.I., Osipov S.P. Approximation of the relationships of the integral and differential attenuation factors of continuous X-rays (bremsstrahlung) to

the absorbing filter thickness // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 1994. – Vol. 30. – no. 9. – P. 716–719.

41. Alles J., Mudde R.F. Beam hardening: analytical considerations of the effective attenuation coefficient of X-ray tomography // *Medical physics*. – 2007. – Vol. 34. – no. 7. – P. 2882–2889.

42. 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. – P. 419–429.

43. Kalender W.A. *Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications*. – John Wiley & Sons, 2011.

44. Maire E., Withers P.J. Quantitative X-ray tomography // *International materials reviews*. – 2014. – Vol. 59. – no. 1. – P. 1–43.

45. Goldman, L.W. Principles of CT: radiation dose and image quality // *Journal of nuclear medicine technology*. – 2007. – Vol. 35. – no. 4. – P. 213–225.

46. Rossmann K. Point spread-function, line spread-function, and modulation transfer function: Tools for the study of imaging systems 1 // *Radiology*. – 1969. – Vol. 93. – no. 2. – P. 257–272.

47. Pakdel A., Mainprize J.G., Robert N., Fialkov J., Whyne C.M. Model-based PSF and MTF estimation and validation from skeletal clinical CT images // *Medical physics*. – 2014. – Vol. 41. – no. 1. – P. 011906-1 – 011906-8.

48. Watson, S.A. Real-time spot size measurement for pulsed high-energy radiographic machines // *Particle Accelerator Conference, Proceedings of the 1993*. – IEEE, 1993. – P. 2447–2449.

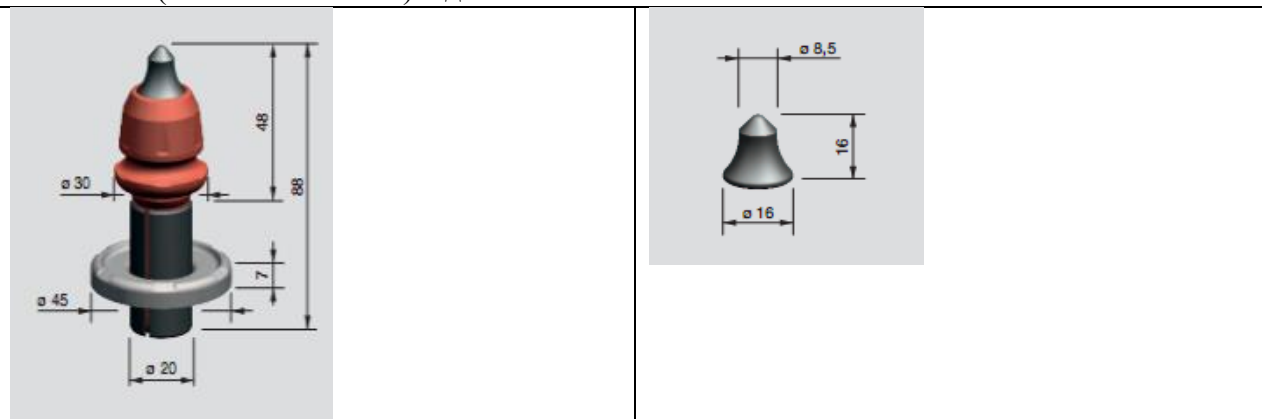
49. Yaffe M.J., Rowlands J.A. X-ray detectors for digital radiography // *Physics in Medicine and Biology*. – 1997. – Vol. 42. – no. 1. – P. 1–39.

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

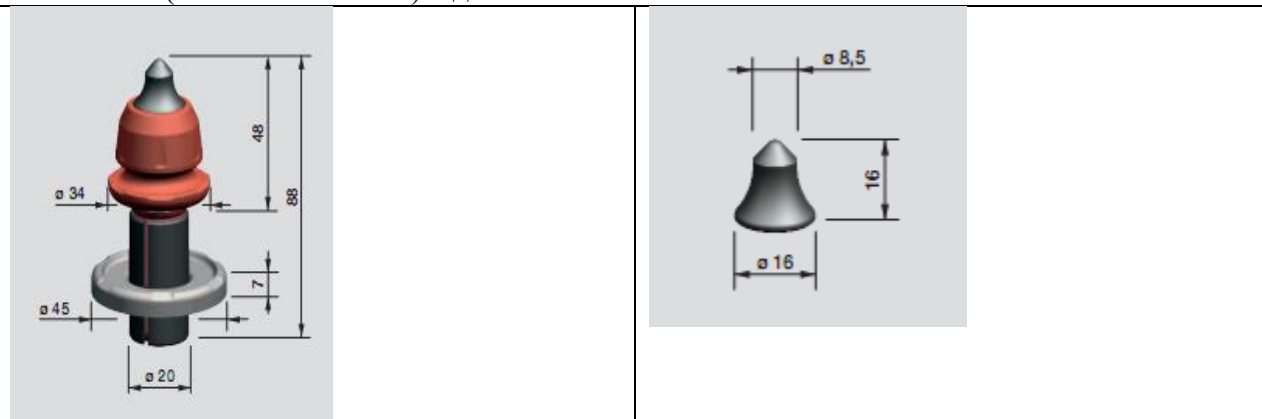
51. Stritt C., Plamondon M., Hofmann J., Flisch A., Sennhauser U. Performance quantification of a flat-panel imager in industrial mega-voltage X-ray imaging systems // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2017. – Vol. 848. – P. 73–80.
52. Mahajan C.S. Mass attenuation coefficients of beta particles in elements // Science Research Reporter. – 2012. – Vol. 2. – no. 2. – P. 135–141.
53. Švec A. New analytical solution to calculate linear absorption coefficients of beta radiations // Applied Radiation and Isotopes. – 2015. – Vol. 102. – P. 63–69.
54. Lempicki A., Brecher C., Szupryczynski P., Lingertat H., Nagarkar V.V., Tipnis S.V., Miller S.R. A new lutetia-based ceramic scintillator for X-ray imaging // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2002. – Vol. 488. – no. 3. – P. 579–590.
55. Kastalsky A., Luryi S., Spivak B. Semiconductor high-energy radiation scintillation detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – Vol. 565. – no. 2. – P. 650–656.
56. Boden S., Bieberle M., Hampel U. Quantitative measurement of gas hold-up distribution in a stirred chemical reactor using X-ray cone-beam computed tomography // Chemical Engineering Journal. – 2008. – Vol. 139. – no. 2. – P. 351–362.

Приложение 1 – Резцы Wirtgen с круглым хвостовиком диаметром 20 мм

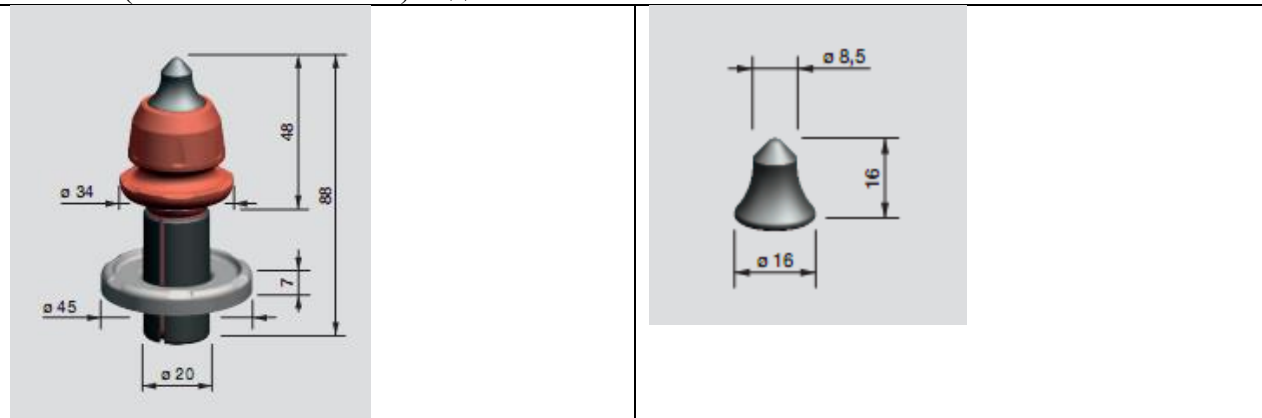
W4-G / 20 (заменено W4 E R) Идент. №: 2218469



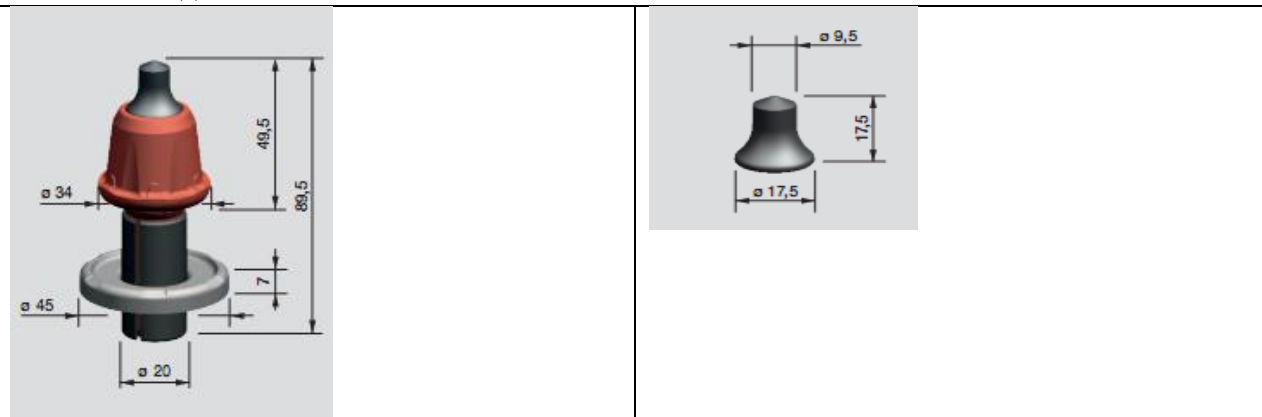
W5-G / 20 (заменено W5 E R) Идент. №: 2218470



W5 / 20 (заменено W5 E H R) Идент. №: 2218476

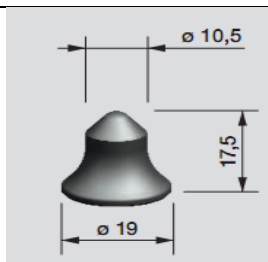
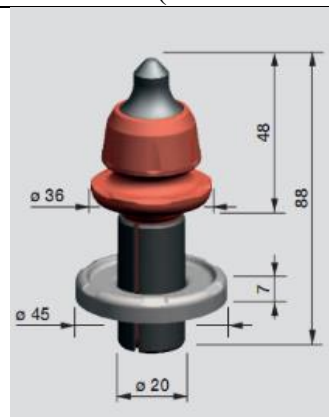


W5L / 20 Идент. №: 2218477

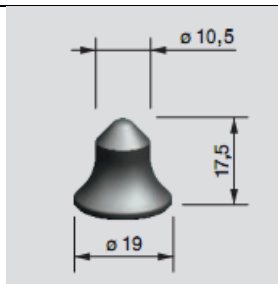
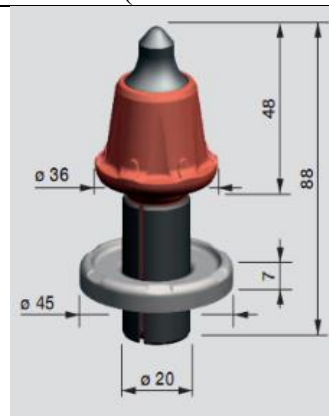


Продолжение приложения 1

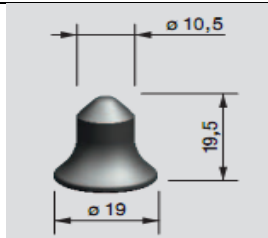
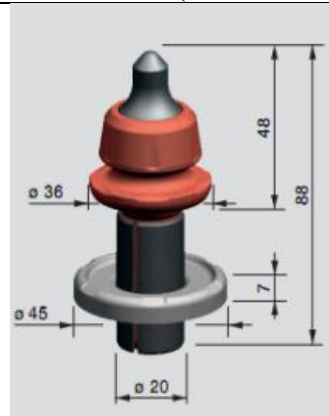
W6-G / 20 (заменено W6 R) Идент. №: 2218471



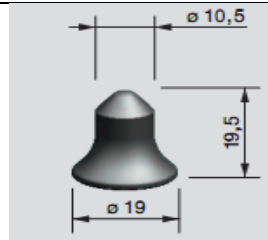
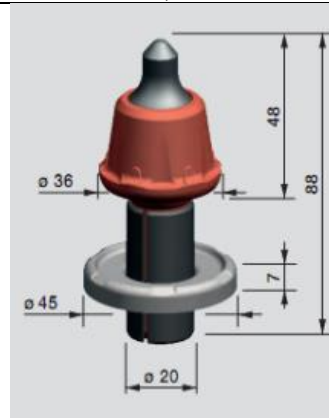
W6 / 20 (заменено W6 H R) Идент. №: 2218478



W6L-G / 20 (заменено W6 E R) Идент. №: 2218472

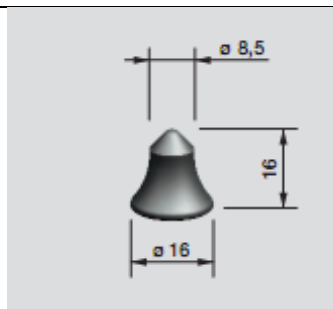
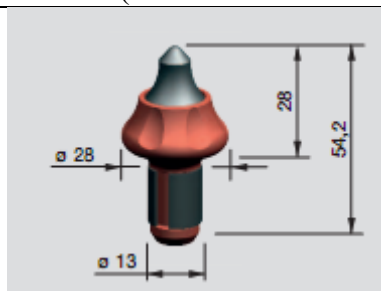


W6L / 20 (заменено W6 E H R) Идент. №: 2218480

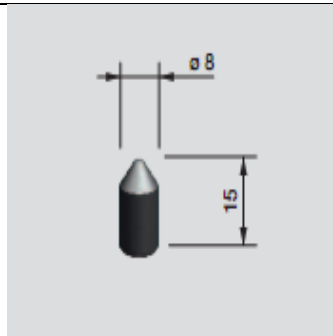
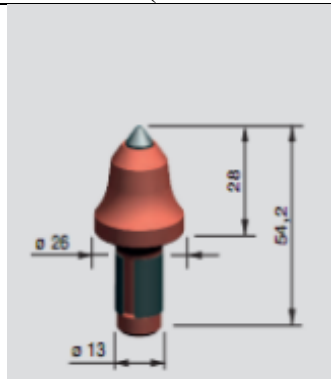


Продолжение приложения 1

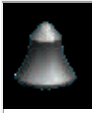











W4 / 13 (заменено WM4 / 13) Идент. №: 182598




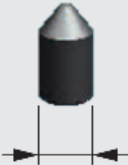



W1-8 / 13 (заменено WM1 / 13) Идент. №: 193701



Приложение 2 – Полная программа поставок резцов с круглым хвостовиком для дорожных фрез

ИСВ	Масса твердого сплава (г)	Минирезец	Стандарт с канавкой для демонтажа	Стандарт без канавки для демонтажа	Специальные модели
		Диаметр 13	Диаметр 20	Диаметр 20	Диаметр 20
 W4	19,7	W4/13	W4-G/20		
 W5	23,4		W5-G/20	W5/20	
 W5L	23,6			W5L/20	
 W6	30,2		W6-G/20	W6/20	
 W6L	32,9		W6L-G/20	W6L/20	
 W6M	36,4			W6M/20	
 W6ML	41		W6ML-G/20		
 W7	41,4		W7-G/20	W7/20	
 W8M	48,6		W8M-G/20	W8M/20	
 W1-8	8,8	W1-8/13			
 W1-10	24,4		W1-10-G/20		W1-10-NG/20
 W1-13	38,3			W1-13/20	

Приложение 3 – Конструкция ИСВ фирмы WIRTGEN

Маркировка	Описание		Графический пример
W	Wirtgen резцы с круглым хвостовиком		
Маркировка	шлемовидных наконечников из тв.сплава		
W4	с диаметр основания 16 мм (Длина: 16 мм)		
W5	с диаметр основания 17,5 мм (Длина: 16 мм)		
W5L	с диаметр основания 17,5 мм (Длина: 17,5 мм)		
W6	с диаметр основания 19 мм (Длина: 17,5 мм)		
W6L	с диаметр основания 19 мм (Длина: 19,5 мм)		
W6C	с диаметр основания 19 мм (Длина: 10 мм)		
W6M	с диаметр основания 19 мм (Длина: 18 мм)		
W6ML	с диаметр основания 19 мм (Длина: 21 мм)		
W7	с диаметр основания 20,5 мм (Длина: 20,5 мм)		
W8	с диаметр основания 22 мм (Длина: 20 мм)		
W8M	с диаметр основания 22 мм (Длина: 21,5 мм)		
Маркировка	цилиндрических наконечников из тв.сплава		Графический пример
W1-8	Диаметр наконечника из твердого сплава 8 мм (Длина: 15 мм)		
W1-10	Диаметр наконечника из твердого сплава 10 мм (Длина: 25 мм)		
W1-13	Диаметр наконечника из твердого сплава 13 мм (Длина: 25 мм)		
W1-15	Диаметр наконечника из твердого сплава 15 мм (Длина: 24 мм)		
W1-17	Диаметр наконечника из твердого сплава 17 мм (Длина: 28,5 мм)		
W1-19	Диаметр наконечника из твердого сплава 19 мм (Длина: 29 мм)		
Форма наконечника из твердого сплава			Графический пример
C	Compact	Наконечник из твердого сплава в плоском исполнении	
L	Long	Наконечник из твердого сплава удлиненный (по высоте)	
M	Massive	Наконечник из твердого сплава в массивном исполнении	

Приложение 4
(справочное)

Раздел № 1.1
Системы радиационного неразрушающего контроля

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6А	Журавский Е.Е.		

Консультант ОКД ИШНКБ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник	Осипов Сергей Павлович	К.Т.Н.		

Консультант – лингвист отделения ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Демьяненко Наталия Владимировна			

1. Mathematical model of the complex of digital radiography

It is emphasized above that over the past twenty years the tendency to radical changes in the development of methods and means of nondestructive testing, testing and diagnostics of various objects of natural and technogenic origin has been noted. Even more significant phenomena have occurred in the methods and means of CR and PBT [21-25]. Perfection of CR and PBT complexes occurs in two main directions: detection and radiating systems of X-ray and bremsstrahlung [26,27]. The intrinsic resolution of the most advanced of modern X-ray loggers has reached microns or less. A high level of spatial resolution and a low value of the time testing of the complexes of digital radiography and X-ray computed tomography could not be achieved without a new generation of x-ray and bremsstrahlung sources [28-30]. Representatives of this new generation are more advanced than the previous generation of electrophysical equipment in accordance with criteria related to the high specific power of radiation by the smallness of the dimensions of the IRI focal spot. At the current stage of the development of digital radiography, the design of the corresponding complexes actually reduces to the choice of IRI, RRI and, if necessary, a mechanical scanning and positioning system. The choice is made from the components available on the market. The criterion of choice is the ability to provide consumer requests for testing and testing. Rational choice of the components of the complex is impossible without the scientific justification of the possibility of achieving design goals. The scientific justification must be based on theoretical studies, the results of which are verified experimentally. The basis of theoretical studies is the mathematical model of the complex of CR, which connects the consumer characteristics of the projected complex and the parameters of the IRI, RRI, taking into account the specifics of the testing object, its material, profile, dimensions, etc. It should be noted that in addition to the significant direct consumer characteristics of the complex of CPUs that are specified in the design specification: the limiting level of radiation contrast, spatial resolution and monitoring

performance, there are auxiliary characteristics that are widely used in the design practice of CR and PBT complexes. The auxiliary characteristics include:

- effective (integral) and average (differential) LCO or MCO X-ray radiation;
- the number of attenuation or the radiation transparency of the OK; the thickness of the OC in the mean free path lengths;
- signal-to-noise ratio (SNR) caused by a given defect.

The advantage of the auxiliary (indirect) characteristics of the CR is the ability to quickly correct the virtual choice of the components of the CR by varying the parameters of the mathematical model and comparing the results of the correction with the results of full-scale tests.

1.1. Features of X-ray detectors for digital radiography systems

The quality of digital radiographic images and, consequently, the quality of radiographic monitoring is significantly associated with the type, design and parameters of X-ray detectors. It was noted above that detectors of indirect and direct conversion of energy transmitted by photonics of RFI are used in CR complexes. The main consumer characteristics of CR complexes are considered to be radiation contrast, spatial resolution and performance, therefore these characteristics are used as a basis for comparison criteria for various realizations of the CR [31].

The primary converter, which is also a radiation sensitive transducer, is the basis of the RIR and it is it that determines the ultimate (expected) consumer characteristics of the CR complexes.

Currently, PPs are used for indirect correction of scintillators for RIRs, and for semiconductor detectors (PDDs) for direct conversion. In the last decade, there has been a trend towards the use of direct conversion PP in X-ray registration systems for CR. Nevertheless, recorders with primary converters of indirect conversion (combined RIRs) prevail in the RIR market. In combined RIP, the process of converting the absorbed energy of photons into an electric current (charge) is a two-stage process. The first stage is connected with the transformation of the energy transmitted by X-ray photons to the PP material into the energy of light photons. The

energy of light photons is detected by photodetectors (photoconverters) of photoconverters. As FP specialized PDD - photodetectors (FD) are used, from which the analog signal is taken and transmitted to the input of the ADC with the subsequent formation of a digital signal. According to the design of the PP, indirect transformations can be: multi-element PP with conditional equivalence of elements; monoblocks - monocrystalline scintillators (screens), polycrystalline screens and screens from scintillation ceramics. The primary converter of combined recorders is executed in the form of a rectangular panel or strip (ruler). The panel or ruler is matched with the matrix (ruler) of the PT. Each phototransducer of a matrix or ruler (a PT element) is associated with a particular pixel. The light radiation incident on the frontal surface of some PT element can be formed in a volume not just directly in front of the photoconverter (perpendicular). It is logical to call this volume an effective sensitive volume. Neighboring effective sensitive volumes can affect each other. The degree of such influence depends on the design of the PP and the involvement in the influence of various physical factors. Such physical factors include light and radiation leakage. It should be noted that the radiation leakage is realized by secondary X-ray photons and secondary electrons. Obviously, the RDIs are divided according to the degree of isolation of effective sensitive volumes, and they share light and radiation isolation. The degree of detachment of effective sensitive volumes is minimal for scintillation and polycrystalline screens. Effective sensitive volumes in the actual matrix and linear recorders can be separated optically and radially. Optical isolation is achieved by a layer of paint, and radiation isolation - by protective screens. The introduction of protective screens in matrix detectors causes the appearance of "dead zones" on radiographic images, compensated by a special organization of image formation. At present, the scintillation crystals CsI, CdWO₄ and scintillation ceramics Gd₂SO₂ have become the most widely used in digital radiography registration systems.

A characteristic feature of primary converters based on direct conversion is, in addition to the registration principle, their multi-element (matrix) structure. It is natural to expect a significant radiation effect of adjacent PP elements on each other.

Note that the RRI output on the basis of scintillation or polycrystalline screens generates a light (explicit) image. However, this explicit image is transformed by a photoconverter into a hidden (virtual) image. For RIM, direct image conversion is initially a virtual image. The transition from virtuality to reality leads to the transformation of a virtual image into a digital radiographic image.

1.2. Formation of digital radiographic image

The basis of the mathematical model of complexes of digital radiography is the description of the process of formation of digital radiographic images, for example, [32]. We will discuss this description step by step in relation to panel recorders of indirect X-ray transformation.

It was noted above that at the output of RRIs of any type a virtual shadow radiation image is formed, which is an ordered set of analog signals. Let each analog signal be formed on its phase transition with the cross-sectional area s , mm². Recall that each FP corresponds to its effective sensitive volume of PP. The mathematical model of the process of formation of digital radiographic images is constructed in the geometry of a narrow mono-directional radiation beam.

Let the testing object be a plane-parallel plate of material with an effective atomic number Z and mass thickness ρH , g / cm². The frontal surface of the RIR with the thickness of the primary converter h , cm is parallel to the planes OK. The X-ray beam with the maximum energy E_{max} , keV, and the energy spectrum $f(E, E_{max})$ fall on the object of the perpendicular inspection. Here, the energy spectrum is the normalized distribution of the number of photons in energy and is the distribution density of the random variable E . The flux density of X-ray photons is n_0 , 1 / (mm² · s). Consider the integral mode of recording X-rays with a measurement time t . It is assumed that the analog signal from the photoconverter $J(E_{max}, Z, \rho H, h)$ is proportional to the energy of the X-ray radiation absorbed in the effective sensitive volume of the RFI. We denote by C_t the corresponding coefficient of proportionality (conversion coefficient). Формула для оценки аналогового сигнала имеет вид [32]

$$J(E_{\max}, Z, \rho H, h) = C_t t \left(n_0 s \int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE + e_d \right) = \quad (1)$$

$$= I(E_{\max}, Z, \rho H, h) + t e_d$$

here $E_{ab}(E, h)$ is the average value of the absorbed energy transferred by a photon with energy E to the effective sensitive volume of the RFP; $\varepsilon(E, h)$ is the energy dependence of the registration efficiency (ER) of X-ray radiation; $m(E)$ is the energy dependence of the mass attenuation coefficient (MCE) of the radiation; e_d is the energy equivalent of the darker currents of the recorder. The values of e_d are estimated experimentally with the X-ray source turned off for each RRI channel and used in the calibration stage for the "black" one. In (1) the signal $I(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ is free from dark signals.

The average value of the absorbed energy $E_{ab}(E, h)$ depends not only on the photon energy E and on the thickness of the RFP h , but also on the RFP material, the transverse dimensions of the effective sensitive volume; therefore, an experimental evaluation of the indicated dependences in full volume is not possible because of the limited material resources. Since the middle of the XXth century, with the advent of the first computers, Monte Carlo methods have been developed that make it possible to replace the field experiment with its simulation - computational experiments. Comparison of the results of full-scale and computational experiments with reference to the physics of the transfer of ionizing radiations has repeatedly proved the validity of replacing complex natural experiments with computational experiments based on the Monte Carlo methods. Therefore, the investigation of the dependencies described above is carried out exclusively by the Monte Carlo method [33]. Below we will consider the case of registrars whose sensitive volumes have the most significant optical and radiation coupling to each other. Such recorders include panel recorders. Analog signals $J(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ with the FP are fed to the ADC input with a resolution of 1, which converts them into digital signals. Analog signals of the form (1) are transformed by analog-to-digital converters (ADCs) into digital signals. The digital signal takes integer values in the range from zero to $L = 2l-1$. It should be

taken into account that the maximum value of the analog signal J is observed for $\rho H = 0$. In accordance with the above, the "unit" of the ADC corresponds to the interval

$$\Delta = \frac{CI(E_{\max}, Z, 0, h)}{(2^l - 1)}, \quad (2)$$

here $C, C > 1$ is the coefficient that prevents ADC overflow with possible fluctuations of analog signals.

The connection of the analog signal $J(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ and the digital signal $J_d(E_{\max}, Z, \rho H, h)$

$$J_d(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \text{int} \left(\frac{J_d(E_{\max}, Z, \rho H, h)}{\Delta} \right). \quad (3)$$

In formula (3), the notation int is a function equal to the whole part of the argument.

Expressions (1) - (3) need a number of explanations and recommendations. In [34, 35] energy intensity distributions for high-energy bremsstrahlung spectra are given. The origin of X-ray radiation and high-energy bremsstrahlung is associated with the deceleration of accelerated electrons, therefore analytical descriptions from [34, 35] can be used not only for the maximum energy range from 1 to 10 MeV, but also for the maximum energy range from 100 to 850 keV. The main goal of the current section of the thesis is to construct the equations for the connection of direct and indirect consumer characteristics of CR systems with the parameters of the components and OK; therefore, to describe the energy spectrum of IRI, we use the maximum simplification of the Kramers formula with correction for the preliminary filtration of radiation. The maximum simplification of the Kramers formula reduces to a representation of the intensity distribution in energy by a decreasing linear function. Preliminary filtration is used in the CR for toughening of X-ray radiation and less influence on the results of testing of non-monoenergetic radiation. An additional positive factor of prefiltration is the elimination of the feature noted in the work, for the calculation of the number of photons with low energy. The formula for calculating the required energy spectrum of the x-ray emission $f(E, E_{\max})$ has the form

$$f(E, E_{\max}) = \frac{(E_{\max} - E)e^{-\mu_f(E)hf}}{E \int_0^{E_{\max}} \frac{E_{\max} - E}{E} e^{-\mu_f(E)hf} dE}, \quad (4)$$

here $\mu_f(E)$ is the energy dependence of the linear attenuation coefficient (LCO) of the radiation for the prefilter material; hf is the thickness of the filter. Formula (4) approaches the approximation of the energy spectrum from [34, 35] with high accuracy.

The expression that describes the energy dependence of registration efficiency is as follows

$$\varepsilon(E, h) = 1 - e^{-\mu(E)h}, \quad (5)$$

where $\mu(E)$ is the energy dependence of the LCO radiation for the material of the primary X-ray transducer.

Necessary in (1), (4), (5) energy dependences of MCE and LCO radiation are calculated using the library [36], which shows the interaction cross sections of gamma radiation with matter.

The energy dependence of the average value of the absorbed energy $E_{ab}(E, h)$ for scintillation and polycrystalline screens is approximated by the expression from [33]

$$\overline{E_+(E, h)} = \overline{E_{\min}(E)} + (E - \overline{E_{\min}(E)}) (1 - e^{-p\mu(E)h}). \quad (6)$$

The approximation parameter p is determined by the scintillator material: $p\text{CsI} = 0.85$, $p\text{CWO} = 0.75$. In Western countries, the abbreviation CWO indicates cadmium tungstate.

The approximation of the energy dependence has the form [33]

$$\begin{aligned} \overline{E_{\min}(E)} = & E \frac{\mu_{foto}}{\mu} + (E - 1,02) \frac{\mu_{par}}{\mu} + \pi r_0^2 N_e \frac{0,511}{\mu} \times \\ & \times \left[\frac{-20\alpha^4 + 102\alpha^3 + 186\alpha^2 + 102\alpha + 18}{3\alpha(1 + 2\alpha)^3} - \frac{2\alpha + 3 - \alpha^2}{\alpha^2} \ln(1 + 2\alpha) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

where μ_{photo} ; N_e - number of electrons per 1 cm³ of RFP material; $\mu_{\text{par-LCOs}}$, related to the photo-absorption effect and the effect of Christmas vapor; $\alpha = E / 0.511$, here the energy E is expressed in MeV.

A natural assumption is that secondary electrons contribute to the leakage of energy from the volume of RFI. And the significance of this factor is amplified with increasing energy of secondary electrons, and, consequently, with increasing energy of primary photons. The energy dependence of the estimate of the dependence $E_{ab}(E, h)$ from below can be carried out on the basis of formulas and recommendations from [37]. To estimate the dependence, we can recommend inserting into the expression (6) a factor that takes into account the leakage of secondary electrons in the approximation straight ahead. This approach is not accurate enough, but it is acceptable at the stage of developing recommendations for the design of the CR complexes.

The set of expressions (1) - (7) allows us to describe the relationship of digital signals with the RIR with the main parameters of the projected complex of CR and the object of testing.

1.3. Characteristics of complexes of digital radiography

For a full-scale description of CR complexes (systems) both from the point of view of the consumer and the designer use a combination of direct and indirect characteristics [38, 39]. CR systems are, first of all, visualization systems (CB). Such systems are characterized by the maximum achievable levels of radiation contrast and spatial resolution, as well as productivity, providing the objectives of testing. At present, applications of the CR and PBT systems are expanding as multifunctional means of measuring the opposite values; in such cases, the achievable measurement accuracy of the corresponding quantities is added to the characteristics noted above. For the functioning of the CR system in the traditional flaw detector mode, the signal-to-noise ratio (SNR) for a given defect is of particular interest.

Direct characteristics of CR and PBT systems are simultaneously their main consumer characteristics. Calculation and experimental methods are used to evaluate

these characteristics. Of course, the computational methods should be based on an adequate mathematical model and their results are verified by experimentally similar objects and a related testing problem. The consumer characteristics of the CR in the calculations are estimated from the indirect characteristics of the systems being designed. It is necessary to note the following significant indirect characteristics of the CR:

- integral registration efficiency;
- integral and differential mass x-ray coefficients;
- the frequency of attenuation of radiation (radiation transparency);
- thickness in the chipboard;
- average value of absorbed energy;
- the average value of the square of the absorbed energy of the registered photon;
- Coefficient of accumulation of fluctuations.

The reason for the introduction and investigation of indirect characteristics is, as a rule, connected with the possibility of evaluating these characteristics with the help of fairly simple theoretical justifications, justified from a physical point of view. Each of the indirect characteristics has its own peculiarity of application, corresponds to other indirect characteristics of the CR systems, and its magnitude, for the most part, can be estimated experimentally.

1.4. Integral registration efficiency

For a monoenergetic source of gamma radiation, ER by determining the ratio of the number of recorded photons to the total number of photons incident on the frontal surface of the RFP. In this case, the ER is estimated by the formula (5). By analogy, we introduce the characteristic RPR ϵ_{int} , which can be called the integrated registration efficiency. It takes into account the energy spectrum of X-rays and the registration regime. The formula for estimating the integral registration efficiency ϵ_{int} has the form

$$\varepsilon_{int}(E_{max}, Z, \rho H, h) = \frac{\int_0^{E_{max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{max}) e^{-m(E, Z)\rho H} dE}. \quad (8)$$

From the analysis of formula (8), we can conclude that the corresponding definition does not have the universality property, since ε_{int} depends not only on the thickness and material of the RFP and the maximum energy of the IRI, but also on the parameters of the testing object. The formula (8) is derived for the ADC with a hypothetical bit capacity $l = \infty$. The practical (experimental) estimation of the integrated registration efficiency ε_{int} is associated with some material costs, since it requires an additional (reference) RIR, the radiation sensitive transducer of which is a "total absorption detector", and an ADC of a higher digit capacity. Taking into account the foregoing, the expression for the experimental estimate of the integrated registration efficiency is written as follows

$$\tilde{\varepsilon}_{int}(E_{max}, Z, \rho H, h) = \frac{J_d(E_{max}, Z, \rho H, h) - J_d(E_{max}, Z, \infty, h)}{J_{d\infty}(E_{max}, Z, \rho H, \infty) - J_{d\infty}(E_{max}, Z, \infty, \infty)}. \quad (9)$$

The index $d\infty$ in the denominator means that the ADC bit depth of the reference RRI is substantially higher than the nominal ADC bit capacity. In formula (9), the original signals for the compared logger and "full absorption" recorder are calibrated "black".

The technical realization of the RIR "full absorption" of high-energy x-ray and bremsstrahlung presents considerable difficulties.

The totality of formulas (3) - (8) is the basis for the estimated evaluation of the expected integral registration efficiency. With the help of these formulas it is possible to investigate the influence of the parameters of IRI, RRI and OK on the value ε_{int} .

A comment. Integral efficiency of registration by the internal essence of its definition is the coefficient of useful use of X-ray radiation and through the number of registered particles affects other direct and indirect parameters of CR systems. Developers of the IRI make every effort to increase the radiation power, and the incorrect selection of RIRs in the design of the CR systems reduces these colossal

efforts to almost zero. However, it should be noted that the designers of the CR systems encounter a lack of understanding by the customer of the inconsistency of some requirements regarding the consumer characteristics of the CR systems. So the implementation of unreasonable requirements to increase the resolution of systems leads to a decrease in testing performance.

1.5. The multiplicity of the attenuation of X-ray radiation and the radiation transparency of the test object

Two practically equivalent concepts are intentionally introduced into the title of the section, which characterize the attenuation of X-ray radiation by the object of testing. The multiplicity of attenuation of X-ray radiation with an unchanged geometrical testing scheme characterizes the perturbation introduced by the object of testing in the field of X-ray radiation. Numerically, the multiplicity of the attenuation M , taking into account the radiation detection, is equal to the ratio of the intensity (flux) of unperturbed X-ray radiation (without OK) to the intensity (flux) of the perturbed X-ray radiation (with OK). Multiplicity of attenuation M determines how many times the maximum value of the analog signal is greater than the minimum value, which is the necessary information parameter for a reasonable choice of the ADC bit depth or for establishing the existing implementation of the CR system supplied by the customer (customer) testing task. In accordance with the definition, the formula for estimating the integral (effective) multiplicity of the weakening M (E_{\max} , Z , ρH , h) has the form

$$M(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}. \quad (10)$$

The multiplicity of the weakening M (E_{\max} , Z , ρH , h) is estimated experimentally by the formula

$$\tilde{M}(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{I_d(E_{\max}, Z, 0, h) - I_d(E_{\max}, Z, \infty, h)}{I_d(E_{\max}, Z, \rho H, h) - I_d(E_{\max}, Z, \infty, h)}. \quad (11)$$

The term - radiation transparency is as popular and common as the multiplicity of attenuation, and is a concept derived from common sense. The estimation of the radiation transparency T is related to the estimate of the reduction multiplicity M by the simplest relation $T(E_{max}, Z, \rho H, h) = M(E_{max}, Z, \rho H, h)$.

Here is one remarkable limitation that fundamentally excludes the possibility of using CR systems with an improper ADC bit capacity: $2l > M(E_{max}, Z, \rho H, h) - 1$.

1.6. The thickness of the object of testing in the mean free path

The term "thickness in free path lengths" is borrowed in radiation methods of non-destructive testing, testing and diagnostics from the physics of protection from x-rays. It should be noted that this term became natural in digital radiography for reasons related to the form of the basic law of attenuation of gamma radiation by the object. This law says that the intensity of radiation beyond the object of testing with increasing thickness is described by an exponential function with a negative exponent, which is proportional to the thickness of the OK.

Analysis of digital radiographic images in the intensity scale for variable thickness products is a complex task because the halftone image rendering devices and the subject viewing halftone images from similar devices are limited to a number of halftones of not more than 256. The deliberate logarithm of the set of digital signals allows analyzing the transformed image in the scale of the thickness of the object of testing in the chipboard. Note that for monochromatic sources of gamma radiation such a scale coincides with the scale of the object thickness in units of linear dimensions (millimeters, centimeters, etc.) to within a factor. This means that this kind of transformation of radiographic images is logical to call linearization and it is natural to expect better results from the analysis of transformed images.

Let's give a formula for calculating the thickness of OK in the EAF $Y(E_{max}, Z, \rho H, h)$

$$Y(E_{\max}, Z, \rho H, h) = -\ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h) dE}. \quad (12)$$

The experimental estimation of the thickness of the OC in the EAF is due to a series of successive actions: calibration by "black"; calibration by "white"; logarithm. The resulting expression has the form

$$\tilde{Y}(E_{\max}, Z, \rho H, h) = -\ln \frac{I_d(E_{\max}, Z, \rho H, h) - I_d(E_{\max}, Z, \infty, h)}{I_d(E_{\max}, Z, 0, h) - I_d(E_{\max}, Z, \infty, h)}. \quad (13)$$

A joint analysis of the expressions (10) and (12) allows us to formalize the relation $Y(E_{\max}, Z, \rho H, h)$, the attenuation multiplicity $M(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ and the radiation transparency $T(E_{\max}, Z, \rho H, h)$

$$Y(E_0, Z, \rho H, h) = \ln M(E_0, Z, \rho H, h) = -\ln T(E_0, Z, \rho H, h). \quad (14)$$

Formula (14) is used in a natural way for the experimental determination of the thickness of an object in a particleboard, for which the theoretical (calculated) values of the multiplicity of attenuation or radiational transparency of the OK are replaced in the formula (14) by the corresponding experimental values.

Expression (14) allows us to formulate a restriction on the thickness of OK in the EAF, starting from the ADCs $l > \ln(M(E_{\max}, Z, \rho H, h) + 1)$.

The obtained restriction is significant for the analysis of CR systems intended for the control of large OCs whose dimensions are close to the limiting penetrability characteristic for the considered level of maximum X-ray energy.

1.6.1. Integral and differential mass attenuation coefficients of X-ray radiation

For monochromatic sources of gamma radiation, the law of attenuation is described by an exponential function with a parameter that depends on the energy of radiation and the material OK, this parameter is called an LCO if the thickness of the OK is measured in centimeters and the MCE is for mass thickness. For nonmonoenergetic sources of gamma radiation and X-ray radiation, some analogs of

LCO and MCO are used - linear and mass effective (integral) and average (differential) attenuation coefficients of x-ray radiation [40-42]. Integral and differential LKO and MCO, in addition to the maximum energy of X-ray radiation, and, accordingly, the energy spectrum depend on the thickness for LCO and the mass thickness for MCOs. When designing a CR system, some degree of universality is often required, which is expressed in the need to monitor objects from various materials. This leads to the fact that for the analysis of the processes of attenuation of X-ray radiation by objects with materials of different densities, the MCO is the more popular characteristic. In high-energy RIRs it is technically difficult to realize the principle of complete absorption. Therefore, to the concepts of integral MKO and differential MKO, it is necessary to add the definition of "instrumental", indicating the specific implementation and parameters of the RIR. Next, we will discuss issues related to instrumental integral and differential mass attenuation coefficients of x-ray radiation - mint and mdiff. Formulas for the calculation of mint and mdiff have the

$$m_{int}(E_{max}, Z, \rho H, h) = -\frac{1}{\rho H} \ln \frac{\int_0^{E_{max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{max}) \varepsilon(E, h) dE},$$

form

$$m_{diff}(E_{max}, Z, \rho H, h) = \frac{\int_0^{E_{max}} m(E, Z) E_{ab}(E, h) f(E, E_{max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_0} E_{ab}(E, h) f(E, E_{max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}.$$

An expression is known that relates the instrumental integral and differential linear attenuation coefficients of x-ray radiation [40]. For MCO, this relationship is described in a similar way

$$m_{diff}(E_0, Z, \rho H, h) = m_{int}(E_0, Z, \rho H, h) + \rho H \frac{\partial m_{int}(E_0, Z, \rho H, h)}{\partial(\rho H)}. \quad (16)$$

The presence of expression (16) allows one to draw a conclusion about the practical sufficiency of one of the parameters - mint or mdiff. Note that each of these parameters is used to assess their specific consumer characteristics of the CR and

PBT systems, so they remain equally in demand at the design stage of the analyzed systems.

As a result of comparing formulas (10), (12) and definitions (15), one can obtain a description of the connection between the attenuation multiplicity M and the radiation transparency T m_{int} and m_{diff}

$$m_{int}(E_{max}, Z, \rho H, h) = \frac{1}{\rho H} \ln M(E_{max}, Z, \rho H, h) = -\frac{1}{\rho H} \ln T(E_{max}, Z, \rho H, h),$$

$$m_{diff}(E_{max}, Z, \rho H, h) = \frac{\frac{\partial M(E_{max}, Z, \rho H, h)}{\partial(\rho H)}}{M(E_{max}, Z, \rho H, h)} = -T(E_{max}, Z, \rho H, h) \frac{\partial T(E_{max}, Z, \rho H, h)}{\partial(\rho H)}.$$
(17)

Analysis of the second formula from (17) indicates the need to evaluate the derivatives of the multiplicity of attenuation and (or) radiation transparency by mass thickness. The natural representation of the derivative in the form of a finite difference leads to a conclusion about the feasibility of this approach on the basis of experimentally measuring the attenuation multiplicity for a stepped test object.

A joint analysis of formulas (12) and (15) leads to the following description of the relationship between the thicknesses of OK in the DSP Y and the integral and differential CIEs m_{int} and m_{diff}

$$m_{int}(E_{max}, Z, \rho H, h) = \frac{Y(E_{max}, Z, \rho H, h)}{\rho H},$$

$$m_{diff}(E_{max}, Z, \rho H, h) = \frac{\partial Y(E_{max}, Z, \rho H, h)}{\partial(\rho H)}.$$
(18)

Formulas (18) are, in comparison with (17), simpler in practical implementation. The experimental estimates of both the integral and differential mass coefficients of X-ray attenuation are found from the measured values of the thickness of the test object in the mean free paths, here $\Delta\rho H$ is the height of the stage of the test object, n determines the range of thickness changes of the OK.

The integral and differential coefficients m_{int} and m_{diff} are used not only to estimate the possible consumer characteristics of the projected systems of the CR, but also to select, for example, the maximum X-ray energy E_{max} .

1.6.2. Relative signal

In the technical task for the design of the CR systems, the type and minimum dimensions of the detected defect are necessarily indicated. For the unification of defects, it is widely logical to use the concept of the difference in thickness.

Let us consider a control object in the form of a plane-parallel plate with mass thickness ρH . As a defect, consider a pore that causes a drop in the mass thickness $\Delta\rho H$. The digital signal $S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H)$, caused by this defect, is described by expression $S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H) = I_d(E_{\max}, Z, \rho H - \Delta\rho H, h) - I_d(E_{\max}, Z, \rho H, h)$.

In radiometry and radiography, the relative signal $\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H)$ is widely used, defined by the formula $\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H) = S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H) / I_d(E_{\max}, Z, \rho H, h)$.

For a monochromatic source of gamma radiation, the relative signal caused by a small increment $\Delta\rho H$ coincides with the determination of the radiation contrast kX . In accordance with the definition introduced above, for the IRI the approximate estimate of the relative signal $\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H)$ is equal to

$$\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H) = \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \left(e^{m(E, Z)\Delta\rho H} - 1 \right) \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}. \quad (19)$$

The assumption of a small increment $\Delta\rho H$ allows us to transform the formula (19) to the following form

$$\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H) \approx \Delta\rho H \frac{\int_0^{E_{\max}} m(E, Z) E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} \varepsilon(E, h) dE}. \quad (20)$$

Taking into account the definition of the differential mass attenuation coefficient of X-ray radiation, formula (20) will look as follows

$$\delta S(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H) \approx m_{diff}(E_{\max}, Z, \rho H, h) \Delta\rho H. \quad (21)$$

Formula (21) is used to calculate the radiative contrast in CR systems based on X-ray sources.

In the experiment, the corresponding estimate of the radiation contrast (relative signal) $\delta\tilde{S}(E_{\max}, Z, \rho H, h, \Delta\rho H)$ is a work $\tilde{m}_{diff}(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ to the increment of the mass thickness $\Delta\rho H$.

1.6.3. Relative noise level

In CR systems, RIRs are used with two main registration modes - counting and integral. The quality of virtual radiographic images in areas free from shadows of defects is determined by the average levels of analog (digital) signals and additionally by relative noise levels. For the counting and integral recording regimes, the relative noise levels δN and δI are estimated using formulas

$$\delta N(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{1}{\sqrt{N(E_{\max}, Z, \rho H, h)}}, \quad \delta I(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{\eta(E_{\max}, Z, \rho H, h)}{\sqrt{N(E_{\max}, Z, \rho H, h)}}, \quad (22)$$

here $N(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ is the number of photons registered by the detector; $\eta(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ is the coefficient of accumulation of fluctuations [33].

The number of photons $N(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ is determined by the characteristics of the IRI, RRI and the geometrical control scheme: the radiation intensity over the air at a distance of 1 m for the maximum possible value of E_{\max} - $P_{0\max}$; the area of the frontal surface of a separate FP; focal distance F ; measuring time t . The expression for estimating the number of photons $N(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ has the form [32]

$$N(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{C_N P_{0\max} s t}{F^2} \frac{\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} E f(E, E_{\max}) \mu_{ab\ air}(E) dE}. \quad (23)$$

In expression (23), $\mu_{ab\ air}(E)$ is the energy dependence of the linear absorption coefficient of photon radiation in air; C_N is the conversion factor of the X-ray intensity (any other characteristic of the X-ray source) to the $\text{MeV} / (\text{s} \times \text{mm}^2)$ dimension.

The coefficient of accumulation of fluctuations $\eta(E_{\max}, Z, \rho H, h)$ [33] is determined by the average values of the absorbed energy of the registered photon $\overline{E(E_{\max}, Z, \rho H, h)}$ and the square of the absorbed energy of the registered photon $\overline{E^2(E_{\max}, Z, \rho H, h)}$

$$\eta^2(E_{\max}, Z, \rho H, h) = \frac{\overline{E^2(E_{\max}, Z, \rho H, h)}}{\overline{E(E_{\max}, Z, \rho H, h)}^2}. \quad (24)$$

Expressions for computation and are written similarly to [33]

$$\overline{E(E_{\max}, Z, \rho H, h)} = \frac{\int_0^{E_{\max}} \overline{E_{ab}(E, h)} f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}, \quad (25)$$

$$\overline{E^2(E_{\max}, Z, \rho H, h)} = \frac{\int_0^{E_{\max}} \overline{E_{ab}^2(E, h)} f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon(E, h) dE}. \quad (26)$$

Sufficiently accurate approximations of the dependencies $\overline{E_{ab}(E, h)}$ и $\overline{E_{ab}^2(E, h)}$ are given in [33] for some scintillation crystals.

It is known that the coefficient of accumulation of fluctuations for IRI is not equal to unity even for full-energy detectors.