

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

---

Институт	Неразрушающего контроля
Направление подготовки	Приборостроение
Кафедра	ФМПК

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

<b>Тема работы</b>
Математическая обработка данных радиометрической дефектоскопии в пакете «PowerGraft»

УДК 620.179.152:004.91

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Ким Виталий Владиславович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Капранов Б.И.	д.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав.кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФМПК	Суржиков А.П.	д.ф.-м.н.		

Томск – 2017 г.

## Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i><b>Профессиональные компетенции</b></i>		
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения.	Требования ФГОС (ОК-14,ПК-1,6,7,8,10,11.12,13,17,23,24,27), Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .
P2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа.	Требования ФГОС (ОК-5,ПК-14,15,19,20,21,28,29,30,33) Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .
P3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества.	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-5,18,31,32), Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .
P4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ОК-1,2,8,11,12, ПК-2,9), Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе.	Требования ФГОС (ПК-3,4,9,16,22,26), Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
Р6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции.	Требования ФГОС (ПК-33), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .
<b>Универсальные компетенции</b>		
Р7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .
Р8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы.	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-28), Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .
Р9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-13), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .
Р10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду.	Требования ФГОС (ОК-4,14,15, ПК-8) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .
Р11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-9), Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i> .

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

---

Институт неразрушающего контроля  
Направление подготовки Приборостроение  
Кафедра Физических методов и приборов контроля качества

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Суржиков А.П.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

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

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5Б	Киму Виталию Владиславовичу

Тема работы:

Математическая обработка данных радиометрической дефектоскопии в пакете «Power Graft»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 9649/с от 09.11.16
Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.05.17

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	1. Объект контроля – изделие цилиндрической формы. 2. Доступ – по всей внешней поверхности объекта контроля. 3. Энергия излучения – 1250КэВ. 4. Максимальная толщина просвечиваемого металла – 600 мм.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	- обзор радиационных методов контроля. - анализ объекта контроля и формирование требований к контролю. - выбор метода и технологии ультразвукового контроля. - анализ и расчёт сцинтилляционного кристалла. - экспериментальные исследования. - усовершенствование радиометрического дефектоскопа РД-30
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация в MicrosoftPowerPoint
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич
Социальная ответственность	Анищенко Юлия Владимировна

Иностранный язык	Вебер Юлия Юрьевна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
1 Обзор методов радиационного контроля	
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Капранов Борис Иванович	д.т.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Ким Виталий Владиславович		

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

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки (специальность) 12.04.01 Приборостроение

Уровень образования: Магистратура

Кафедра Физических методов и приборов контроля качества

Период выполнения (осенний/весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма представления работы:

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

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**Выполнения выпускной квалифицированной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.05.2017
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
13.03.17	Выбор направления исследования и способы решения задач	5
20.03.17	Изучение и анализ научной литературы	20
10.04.17	Усовершенствование радиометрического дефектоскопа РД-30	20
24.04.17	Проведение экспериментальных исследований	10
5.05.17	Анализ геометрии и эффективности сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) размером 100x100мм	10
12.05.17	Обработка и анализ полученных результатов	5
19.05.17	Оценка полученных результатов	10
26.05.17	Оформление пояснительной записки	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Капранов Борис Иванович	д.т.н		

**СОГЛАСОВАНО:**

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

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1БМ5Б	Киму Виталию Владиславовичу

<b>Институт</b>	Неразрушающего контроля	<b>Кафедра</b>	ФМПК
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Приборостроение

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ):</i>	<i>Затраты на выполнение НИР включают в себя затраты на сырье, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, основную и дополнительную заработную плату исполнителей, отчисления на социальные нужды, накладные расходы</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>НИР выполнялась в соответствии со стандартной системой налогообложения, отчислений, кредитования</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Fast- анализ</i>	<i>Функционально стоимостной анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, анализ стоимости функций выполняемых объектом исследования</i>
2. <i>Инициация проекта</i>	<i>Информация о заинтересованных сторонах проекта, цели и ожидаемые результаты НИР, трудозатраты и функции исполнителей проекта</i>
3. <i>Планирование управления научно-техническим проектом</i>	<i>Составление перечня этапов и работ по выполнению НИР, составление калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов</i>
4. <i>Оценка сравнительной эффективности исследования</i>	<i>Расчёт интегрального показателя эффективности НИР, за счёт определения его основных составляющих: финансовой эффективности и ресурсоэффективности</i>

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

1. <i>График Fast-анализа</i>
2. <i>График проведения и бюджет НИИ</i>
3. <i>Календарный план проекта</i>
4. <i>Длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе (диаграмма Ганта)</i>
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ассистент	Николаенко Валентин Сергеевич			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1БМ5Б	Ким Виталий Владиславович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа 1БМ5Б	ФИО Киму Виталию Владиславовичу
-----------------	------------------------------------

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

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

1. Характеристика объекта исследования и области его применения	<i>Исследование ведется в области неразрушающего контроля. Основной целью является математическая обработка данных радиометрической дефектоскопии, в частности дефектоскопом РД-30РМ</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения 1.3. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.	<i>-воздействие излучений (электромагнитное и радиочастотное) -недостаточная освещенность рабочей зоны; -отклонение показателей микроклимата от нормальных; -влияние шума; -повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне; -электрический ток</i>
<b>2. Экологическая безопасность:</b>	<i>Воздействие на литосферу сводится к минимуму, за счет отсутствия загрязняющих веществ.</i>
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<i>Возможные чрезвычайные ситуации являются: ситуации техногенного характера.</i>
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	<i>- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	27.04.2017 год
--	----------------

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Ким Виталий Владиславович		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 113 с., 29 рис., 23 табл., 34источн., 1 прил.

Ключевые слова: радиометрическая дефектоскопия, гамма-кванты, сцинтилляционный кристалл, дефектограмма, PowerGraph.

Объектом исследования является: изделие цилиндрической формы и радиометрический дефектоскоп РД-30РМ

Цель работы – изучение литературы по радиационному неразрушающему контролю, усовершенствование радиометрического дефектоскопа РД-30РМ, расчет эффективности сцинтилляционного кристалла NaI(Tl), отображение дефектограмм в пакете «PowerGraph» для дальнейшей математической обработки.

Метод проведения исследования: Радиометрическая дефектоскопия — метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого изотопом  $Co^{60}$  с  $E_0=1250$ КэВ, в виде электрических сигналов различной величины.

В процессе исследования проводились:

- описание метода радиометрического контроля;
- основные элементы РД-30РМ;
- отображение полученных данных в пакете «PowerGraph»
- анализ дефектограммы, полученной в пакете «PowerGraph»;
- экспериментальные исследования;
- анализ геометрии и эффективности размера сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) 100x100мм.

В результате исследования были оцифрованы результаты радиометрического контроля и подобран сцинтилляционный кристалл с необходимой эффективностью регистрации гамма-квантов.

Область применения исследования – ПО «Чебоксарское производственное объединение им В.И. Чапаева», город Чебоксары.

## Определения

В данной магистерской диссертации применены следующие термины с соответствующими им определениями:

**Радиометрическая дефектоскопия:** метод получения информации, с помощью которого возможен поиск дефектов контролируемого изделия, путем просвечивания ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины, длительности или количества).

**Гамма квант:** ( $\gamma$ -излучение) – электромагнитное излучение, принадлежащее наиболее высокочастотной (коротковолновой) части спектра электромагнитных волн.

**Сцинтилляционный кристалл:** вещество, обладающее способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения (гамма-квантов, электронов, альфа-частиц). Как правило, излучаемое количество фотонов для данного типа излучения приближённо пропорционально поглощённой энергии, что позволяет получать энергетические спектры излучения

**Дефектограмма:** запись сигналов дефектоскопа в зависимости от текущей координаты каната относительно начальной точки, представляемая на бумажном, магнитном или электронном носителе.

**PowerGraph:** программный пакет, используемый для регистрации, визуализации, обработки и анализа сигналов и позволяющий использовать персональный компьютер в качестве стандартных измерительных и регистрирующих приборов вольтметров, самописцев, осциллографов, спектроанализаторов.

## Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1 ГОСТ Р 1.5 – 2012 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.

2 ГОСТ 2.104 – 2006 Единая система конструкторской документации. Основные надписи.

3 ГОСТ 2.105 – 95 Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.

4 ГОСТ 2.106 – 96 Единая система конструкторской документации. Текстовые документы.

5 ГОСТ 3.1102 – 2011 Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов.

6 ГОСТ 3.1105 – 2011 Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов общего назначения.

7 ГОСТ 7.0.5 – 2008 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка.

8 ГОСТ 7.1 – 2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание.

9 ГОСТ 7.9 – 95 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация.

10 ГОСТ 7.32 – 2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

11 ГОСТ 8.417 – 2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.

## **Обозначения и сокращения**

РК – радиационный контроль;

МНК – методы неразрушающего контроля;

НК – неразрушающий контроль;

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель;

ПО – программное обеспечение;

ОК – объект контроля;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;

СИЗ – средства индивидуальной защиты;

МЭД – мощность экспозиционной дозы;

ТБ – техника безопасности;

## Оглавление

Введение	15
1 Обзор методов радиационного неразрушающего контроля	18
1.1 Источники ионизирующих излучений	18
1.2 Источники гамма-излучения	20
1.3 Радиография	22
1.4 Радиоскопия	28
1.5 Флюороскопия	33
1.6 Радиометрия	35
1.7 Области применения радиометрического метода НК	41
2 Исследование радиометрического дефектоскопа	44
2.1 Сцинтилляционные $\gamma$ -спектрометры	44
2.2 Радиометрический дефектоскоп РД–30РМ	49
2.3 Устройство и работа прибора	51
2.4 Физические процессы, возникающие в сцинтилляторах под действием излучений	53
2.5 Фотоумножители	63
2.6 Изотоп $\text{Co}^{60}$	66
2.7 Модуль АЦП USB 3000	67
2.8 ПО «PowerGraph»	68
3 Экспериментальные исследования	72
3.1 Обработка результатов радиометрического контроля	72
3.2 Анализ геометрии и эффективности работы сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) для излучения $\text{Co}^{60}$ ( $E_0=1250\text{КэВ}$ )	75
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	81
4.1 FAST-анализ	81
4.2 Инициация проекта	88
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом	89
4.3.1 План проекта	89
5 Социальная ответственность	95

5.1	Производственная безопасность	95
5.1.1	Анализ вредных и опасных производственных факторов	95
5.1.2	Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.	96
5.2	Экологическая безопасность	101
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	103
5.4	Законодательное регулирование радиационной безопасности.	105
	Заключение	107
	Список публикаций	109
	Список использованных источников	110
	Приложение А	113

## ВВЕДЕНИЕ

Магистерская диссертация посвящена исследованиям, которые лежат в области неразрушающего контроля (НК), а именно радиометрического метода неразрушающего контроля. Суть неразрушающего контроля заключается в выявлении дефектов в виде нарушений сплошностей внутри изделия, контроль геометрических параметров дефектов без нарушения целостности контролируемого объекта.

Радиационные методы неразрушающего контроля широко применяются в различных отраслях науки, промышленности, гражданского и транспортного строительства. Одним из наиболее развивающихся направлений радиационных методов является радиометрия. Это связано с прогрессом в области систем детектирования ионизирующих излучений, с совершенствованием источников ионизирующих излучений, с появлением новых технологий и возможностей для получения, архивации и анализа дефектограмм. Наибольшее распространение радиометрия получила в промышленности. К главным показателям качества радиационного контроля относятся чувствительность, пространственное разрешение, производительность.

На конечном этапе контроля объекта цифровое отображение дефектограммы является более эффективным, с точки зрения более быстрой и тщательной обработки данных, чем отображение на ленте самописца. Представление изображения в цифровом виде позволяет специалисту неразрушающего контроля при расшифровке снимка ряд возможностей. Эти возможности связаны с цифровой обработкой дефектограмм и приводят к повышению достоверности контроля и увеличению производительности анализа радиометрического контроля.

Для автоматизации процесса контроля в модифицированном варианте дефектоскопа РД-30РМ для регистрации и обработки результатов контроля использованы АЦП USB-3000 и математический пакет программ «PowerGraph». Для определения характеристик дефектов используется команды

математической обработки дефектограммы, но не на ленте самописца, а в ПК. Результаты обработки выдаются в цифровом виде на стандартном принтере.

**Объект исследования и предмет:** Радиометрический неразрушающий контроль и дефектоскоп РД-30РМ

**Предмет исследования** – контроль качества объектов цилиндрической формы с целью выявления отклонения плотности и скрытых дефектов.

**Научная и практическая новизна** – усовершенствован дефектоскоп РД-30РМ, дефектограмма отображается в цифровом виде, что способствует более тщательной математической обработки результатов контроля.

**Практическая значимость результатов ВКР** – подобран оптимальный размер сцинтилляционного кристалла для более эффективной регистрации гамма-квантов, применен пакет «PowerGraph» для обработки дефектограмм.

**Реализация и апробация работы** – при проведении радиометрического контроля результаты были получены в пакете PowerGraph, после чего произведена математическая обработка дефектограммы и выявлены расположение и размер дефектов.

Результаты исследования были опубликованы на XVIII Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация», Россия, Барнаул, 18 мая 2017 г.

Цель работы – изучение литературы по радиометрической дефектоскопии объектов цилиндрической формы и усовершенствование дефектоскопа РД-30РМ с целью получения цифровой дефектограммы и её математической обработки в пакете «PowerGraph» для определения характеристик величины отклонения плотности.

Задачи, которые необходимо решить для достижения данной цели:

- 1) Обзор радиометрических методов контроля изделий цилиндрической формы;
- 2) Анализ объекта контроля;
- 3) Выбор АЦП для преобразования сигнала поступающего с ФЭУ;
- 4) Математический анализ результатов радиометрического контроля;

- 5) Экспериментальные исследования;
- 6) Анализ геометрии и эффективности сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) размером 100x100мм.

# 1 Обзор методов радиационного неразрушающего контроля

## 1.1 Источники ионизирующих излучений

При радиационном контроле используют, как минимум, три основных элемента (рис. 1.1):

- источник ионизирующего излучения;
- контролируемый объект;
- детектор, регистрирующий измерения.

При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется - поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины ( $\delta$ ) и плотности ( $\rho$ ) материала контролируемого объекта, а также от интенсивности  $I$  и энергии  $E$  излучения. При наличии в веществе внутренних дефектов размером ( $\delta$ ) изменяются интенсивность пучка излучения.

Изделия просвечивают с использованием различных видов ионизирующих излучений, классификация которых приведена на рис. 1.2 [1].

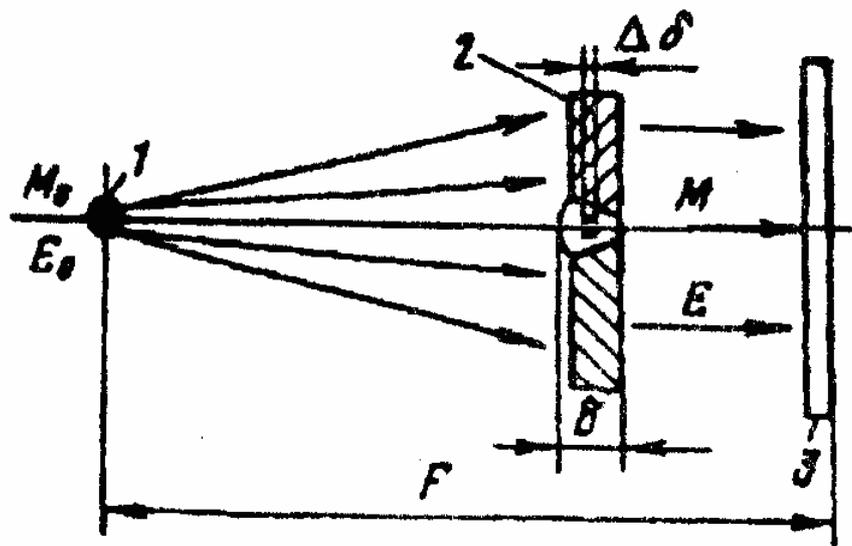


Рисунок 1.1 - Схема просвечивания: 1 - источник; 2 - изделие; 3 – детектор

В радиационном контроле используют в основном три вида ионизирующих излучений: рентгеновское, гамма ( $\gamma$ ) и нейтронное излучения. Источниками рентгеновского излучения в промышленности служат ускорители электронов (рентгеновские аппараты, бетатроны, микротроны, линейные ускорители и т.п.) и источники бета ( $\beta$ ) излучения. В качестве источников  $\gamma$ -

излучения используются в основном радиоактивные (радионуклидные) источники. Источниками нейтронов являются ядерные реакторы, радиоактивные источники и ускорители заряженных частиц (генераторы).

Ускорители электронов различаются по конструкции, назначению, максимальной энергии электронов и другим характеристикам. Ускорители классифицируются по форме траектории частиц в ускорителе, принципу ускорения. По форме траектории электронов ускорители делятся на линейные, в которых траектории частиц близки к прямой линии, и циклические, в которых электроны под действием ведущего магнитного поля движутся по орбитам, близким к круговым.

По принципу ускорения, т.е. по характеру ускоряющего электрического поля, ускорители классифицируются на высоковольтные, индукционные и резонансные. В высоковольтных ускорителях ускоряющее электрическое поле обусловлено большой разностью потенциалов между электродами ускоряющего промежутка и действует в течение интервала времени, значительно большего времени пролета электроном всего пути ускорения. В таких ускорителях траектория электронов является преимущественно прямолинейной. В ускорителях индукционного типа ускорение электронов осуществляется с помощью вихревого электрического поля. Принцип ускорения резонансных ускорителей основан на так называемом резонансном ускорении, при котором движение электронов происходит синхронно с переменным ускоряющим полем. Частота ускоряющего поля может быть постоянной или монотонно изменяющейся. Ускорители этого типа, как и индукционные, могут быть линейные и циклические [1].



Рисунок 1.2 - Классификация источников ионизирующих излучений.

## 1.2 Источники гамма-излучения

В радиационном контроле наиболее широко применяются высокоэнергетические источники  $\gamma$ -излучения. Гамма-излучение - сильно проникающее излучение, не отклоняющееся ни в электрическом, ни в магнитном полях. Гамма-излучение по свойствам аналогично лучам Рентгена. Гамма-излучение - это фотонное излучение, возникающее при ядерных превращениях или при аннигиляции частиц (переходы между возбужденными состояниями ядер атомов).

$$E=h\nu=(10^{-10} \div 10^6) \text{ эВ}; \lambda=(10^{-10} \div 10^{-13})\text{м} \quad (1)$$

При  $\beta$ -превращениях сопровождающее распад  $\gamma$ -излучение отличается большим разнообразием энергии фотонов, т.к. при одном акте  $\beta$ -распада, как правило, возникает несколько  $\gamma$ -квантов.

В спектре  $\gamma$ -излучения естественных радионуклидов на долю  $\beta$ -излучателей приходится большая доля  $\gamma$ -излучения, в том числе и  $\gamma$ -излучения с наибольшими энергиями.

Энергетический спектр источников  $\gamma$ -излучения линейчатый, т.е. состоит из набора моноэнергетических фотонов с различной плотностью потока энергии излучения (или «интенсивностью»). И только некоторые источники имеют непрерывный спектр - это именно источники тормозного фотонного излучения.

Условно источники  $\gamma$ -излучения можно разделить на:

- высокоэнергетические:  $E_{\text{эф}} \geq 0,8$  МэВ, например  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ;
- среднеэнергетические:  $0,3 < E_{\text{эф}} < 0,8$  МэВ, например  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ;
- низкоэнергетические:  $E_{\text{эф}} < 0,3$  МэВ, например  $^{170}\text{Tm}$ ;,  $^{75}\text{Se}$ ;

Здесь величина  $E_{\text{эф}}$  эффективная энергия фотонного излучения - это энергия фотонов такого моноэнергетического излучения, относительное ослабление которого в поглотителе (материале) определенного состава и определенной толщины такое же, как у рассматриваемого немонаэнергетического излучения.

Важнейшие  $\gamma$ -источники для радиационного контроля:  $^{170}\text{Tm}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ; более ограниченно применяют  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{155}\text{Eu}$ ,  $^{169}\text{Yb}$ , (иттербий) и др. в связи с их высокой стоимостью, сложностью получения исходного сырья и трудностями отделения примесей. В некоторых источниках при получении основного изотопа не удается полностью избавиться от радиоактивных примесей, например в источниках  $^{137}\text{Cs}$  содержится до 7 %  $^{137}\text{Cs}$  с многочисленными линиями в диапазоне от 0,086 до 1,57 МэВ и периодом полураспада 2,07 года. В источниках из  $^{145}\text{Sm}$  - до 27 % примесей  $^{152}\text{Eu}$  и  $^{154}\text{Eu}$  с энергиями до 1,5 МэВ. Наличие примесей обязательно учитывают при расчете защиты от излучения.

Радиационно-дефектоскопические характеристики  $\gamma$ -источников определяют:

- энергия  $E$  - проникающую способность излучения и выявляемость дефектов в контролируемых материалах с разными толщиной и плотностью;
- мощность  $P$  экспозиционной дозы (МЭД) излучения - производительность контроля, требования по ТБ и РБ;
- удельная активность  $A$  источника - размеры активной части, а, следовательно, и геометрию контроля, нерезкость изображения, разрешающую способность контроля;
- наличие радиоактивных примесей - ухудшение выявляемости дефектов при использовании источников низкоэнергетического излучения;

– период  $T_{1/2}$  - периодичность замены источников, затраты на их приобретение и захоронение.

Энергия радионуклидного источника определяется свойствами используемого радионуклида и примесей. МЭД излучения зависит от суммарной активности изотопа, расположенного в объеме активной части источника, поэтому повышение МЭД возможно за счет увеличения размеров активной части, но это чаще нежелательно, т.к. выигрыш в производительности не компенсируется проигрышем в виде ухудшения выявляемости дефектов и увеличения нерезкости изображения. Кроме того, для низкоэнергетических источников ( $^{170}\text{Tm}$ ) увеличение размеров активной части приводит к изменению спектра энергий из-за самопоглощения излучения материалом активной части источника. Другой способ повышения МЭД излучения источников - увеличение их удельной активности. Удельная активность  $A$  изотопа зависит от плотности потока нейтронов  $\Phi$  в реакторе (при активации источника), сечения взаимодействия нейтронов с изотопом, от самопоглощения, но в основном зависит от плотности потока нейтронов в реакторе и времени активации. МЭД излучения источника постоянно уменьшается из-за происходящего распада[2]

Таблица 1.1 - Применимость различных  $\gamma$ -источников

Изотоп	Энергия фотона, МэВ	Период полураспада $T_{1/2}$	Толщина контролируемых материалов, Fe, мм
$^{60}\text{Co}$	1,17/1,33	5,3 лет	40 ... 160
$^{192}\text{Ir}$	0,3 ... 1,06 (max 0,3...0,5)	74,5 дней	6... 100
$^{170}\text{Tm}$	0,084	127 дней	0...5
$^{137}\text{Cs}$	0,661	30 лет	30...100

### 1.3 Радиография

Радиографический метод контроля качества материалов, деталей, узлов и изделий основан на преобразовании радиационного изображения

контролируемого объекта в радиографический снимок, представляющий собой распределение плотности почернения на рентгеновской пленке и фотопленке. Сущность радиографии заключается в просвечивании (рис. 1.3) контролируемого объекта ионизирующим излучением и последующем анализе формы, размеров и расположения внутренних дефектов (неоднородностей) по их теневому изображению, полученному в результате фотографического преобразования скрытого радиационного изображения в видимое [3].

Радиографический метод основан на преобразовании рентгеновского и гамма-излучения, способном вызывать почернение эмульсии пленки. Степень почернения различных участков рентгеновской пленки после ее соответствующей фотообработки определяется величиной поглощенной дозы излучения, которая зависит от плотности, толщины и однородности поглотителя излучения. В зависимости от вида применяемого излучения различают: рентгенографию (рентгеновский снимок) и гаммаграфию ( $\gamma$ -снимок).

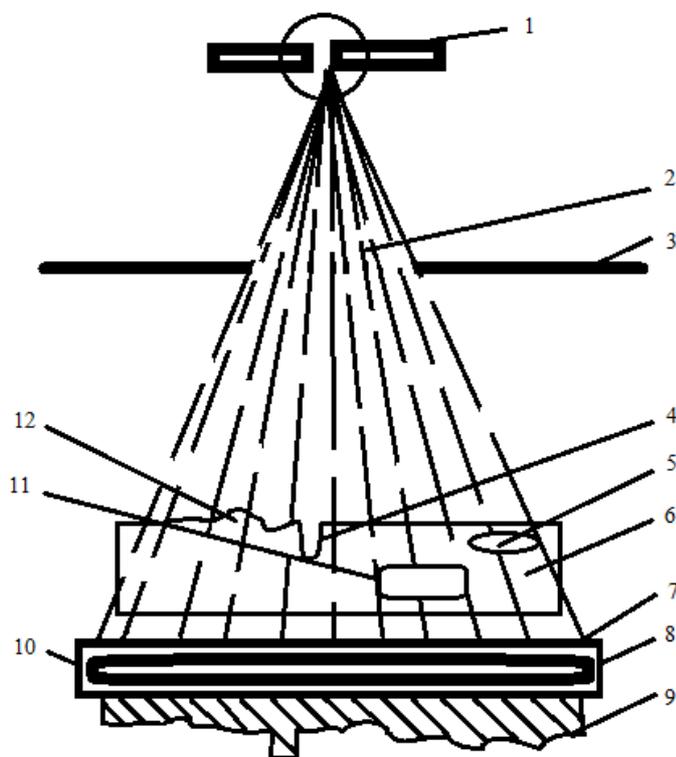


Рисунок 1.3. - Схема радиографирования детали: 1 - источник излучения; 2 - рентгеновское или  $\gamma$ -излучение; 3 - диафрагма, ограничивающая

конус излучения; 4 - впадина на поверхности детали; 5 - воздушная полость; 6 - деталь; 7 - усиливающие экраны; 8 - рентгеновская пленка; 9 - эпюра интенсивности излучения на выходе из просвечиваемой детали; 10 - кассета; 11 - включение, плотнее основного материала детали; 12 – утолщение.

Выявляемость дефектов рентгено- или  $\gamma$ -снимком — это количественная характеристика данного метода контроля, т.е. способность этого метода обнаруживать реальные дефекты (сварки, пайки, литья и других технологических процессов) в конкретных производственных условиях. Если при просвечивании объекта дефекты на снимке не обнаружены, то это не означает, что их нет. Дефект может быть расположен таким образом, что при выбранном режиме и схеме просвечивания он не выявляется. Не обнаруживается и слишком маленький дефект, так как чувствительность метода имеет определенную величину и в данном случае может оказаться недостаточной.

Выявляемость дефектов  $n$  характеризуются отношением числа обнаруженных дефектов  $N$  к полному числу дефектов  $N_0$  в исследуемом участке объекта:

$$n = N/N_0, \quad (2)$$

Следовательно, максимально возможная выявляемость дефектов равна единице, однако практически она всегда меньше единицы и зависит от чувствительности метода.

Под чувствительностью радиографического метода подразумевают минимальную протяженность обнаруживаемого по рентгено- и  $\gamma$ - снимкам дефекта в направлении просвечивания, выраженную либо в единицах длины (абсолютная чувствительность), либо в процентах толщины просвечиваемого материала (относительная чувствительность).

Размер дефекта в процентах толщины просвечиваемого материала выражается формулой:

$$K = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% = \frac{l-l_1}{l} \cdot 100\%,$$

где  $l$  - толщина материала в направлении просвечивания, мм;  $l_1$ — толщина материала в этом же месте, уменьшенная на величину дефектов  $\Delta l$ , мм.

Чувствительность радиографического метода зависит от основных факторов: энергии первичного излучения, рассеянного излучения, плотности и толщины просвечиваемого материала, формы и места расположения дефекта по толщине исследуемого материала, геометрических условий просвечивания (геометрических размеров источника, размера поля облучения и фокусного расстояния), оптической плотности и контрастности снимка, качества пленок, усиливающих экранов и т.д.

Под воздействием ионизирующего излучения в пленке происходят фотохимические реакции, и при проявлении это обуславливает потемнение пленки - ее оптическую плотность. Оптическая плотность снимка это величина, равная десятичному логарифму непрозрачности пленки. Непрозрачность пленки характеризует ослабление проходящего через нее светового потока и численно равна отношению светового потока, падающего на пленку, к потоку, прошедшему через нее.

При выборе энергии излучения необходимо учитывать следующее: для исследованных материалов и источников излучения с понижением энергии первичного излучения увеличивается линейный коэффициент ослабления узкого пучка излучения, и это улучшает выявляемость дефектов; с увеличением просвечиваемой толщины увеличивается вероятность рассеяния первичного излучения, и это ухудшает выявляемость дефектов.

Сплавы на основе железа, по сравнению с легкими сплавами, сильнее ослабляют рентгеновское и  $\gamma$ -излучения, поэтому при просвечивании этих сплавов достигается сравнительно высокая выявляемость дефектов. В рентгенографии имеется возможность регулировать чувствительность метода, изменяя энергию рентгеновского излучения. В гаммаграфии, вследствие низкого коэффициента ослабления излучения радиоактивных источников в

магниевого сплава, чувствительность метода для этих сплавов ниже, чем для стали. По этой же причине выявляемость дефектов, например, в титановых сплавах будет выше по сравнению с алюминиевыми сплавами и ниже по сравнению со сталью.

Практически область применения любого источника излучения ограничивается задаваемой величиной минимального выявляемого дефекта. При выборе источника излучения для контроля качества изделий из материалов различной плотности и толщины, в первую очередь, учитывают, насколько контроль с применением данного источника по степени обнаружения дефектов сварки, пайки, литья и других технологических процессов будет удовлетворять техническим требованиям на изготовление, приемку и эксплуатацию контролируемого изделия.

Выявляемость дефектов радиографическим методом зависит от качества снимка, которое характеризуется контрастностью, а также резкостью изображения на снимке контуров внутренних дефектов контролируемого объекта.

Контрастностью элементов изображения на снимке называется разность между значениями оптической плотности в двух соседних участках снимка. Визуальная оценка контрастности зависит от физиологических и психологических особенностей наблюдателя. Экспериментально установлено, что минимальная разность почернений двух участков снимка (контрастность), которую способен различать глаз человека, равна примерно 0,02-0,03, так что внутренние дефекты очень малых размеров на снимке могут не обнаруживаться.

Резкостью (или четкостью) называется качество снимка, дающее возможность различать линии и контуры элементов и дефектов контролируемых объектов на полученном снимке. Резкость характеризуется шириной границы перехода от потемнения к посветлению. Чем шире переход от светлых участков к темным, тем больше размытость контуров и тем труднее различить границы областей, т.е. тем ниже резкость. Резкий снимок

определяется хорошо видимыми очертаниями (контуром) просвечиваемого объекта и дефектов в материале.

Чувствительность радиографического метода зависит также от места расположения дефекта по толщине. Дефект, расположенный ближе к пленке, значительно легче обнаружить, чем такой же дефект, удаленный от нее. Это происходит по двум причинам: во-первых, ухудшаются геометрические условия просвечивания, во-вторых, по мере увеличения толщины материала между пленкой и дефектом возрастает доля рассеянного излучения, которое отрицательно влияет на качество рентгено- и  $\gamma$ -снимка.

При прохождении излучения каждая частица материала становится источником так называемого вторичного рассеянного излучения, и изображение на пленке получается нерезким и менее контрастным в результате наложения рентгено- или гамма-грамм от этих источников вторичного рассеянного излучения. Рассеянное излучение является отрицательным фактором, воздействующим на пленку и уменьшающим резкость и контрастность изображения объекта.

Отношение значений мощности экспозиционной дозы рассеянного и первичного излучения зависит и от плотности поглотителя. Рассеянное излучение от тяжелых элементов, подобных свинцу, относительно невелико, в чем и заключается их ценность для защиты пленки в кассете.

Если поперечное сечение поглотителя имеет переменную толщину или края контролируемого объекта попадают на пленку, то условия радиографирования значительно ухудшаются; воздействие на пленку рассеянного излучения в некоторых местах может превысить воздействие нерассеянного излучения в десятки раз [4].

Повышение энергии ведет к увеличению пробега электронов, что, в свою очередь, снижает четкость изображения. Воздействие освободившихся электронов на пленку зависит от первичного излучения и от качества эмульсии пленки. При поглощении излучения высвобождаются электроны, энергия которых может приближаться к энергии первичного излучения. Многократное

рассеяние приводит к образованию в поглотителе потока электронов во всех направлениях. Из зависимости ионизации от глубины проникновения в свинец излучения с энергией 22,5 МэВ можно сделать вывод, что оптимальная толщина свинцового экрана с точки зрения усиления изображения равна 2,5 мм, но это справедливо лишь в случае отсутствия просвечиваемого объекта, иначе электроны от объекта будут способствовать накоплению ионизации.

При высоких энергиях излучения просвечиваемый объект играет роль усиливающего экрана.

Экраны обычно применяют в тесном контакте с пленкой, и электроны имеют более короткий пробег в свинце, чем в большинстве материалов, подвергающихся радиографии. В случае низкой энергии излучения для получения максимальной ионизации необходима меньшая толщина экрана.

Для определения наиболее эффективной технологии промышленной радиографии необходимо учитывать следующие факторы: вид излучения; его энергию и интенсивность (напряжение и ток рентгеновской трубки), тип радиоактивного источника и его активность; характер, форму и размеры детали (изделия), ее массу, положение, толщину и плотность материала; технологию изготовления детали (сварка, литье и т.д.); задачи исследования (общий контроль объекта или проверка его отдельных участков); требования к исследованию (чему отдается предпочтение — высокой четкости, контрастности и плотности снимков или сокращению экспозиции).

#### **1.4 Радиоскопия**

Под радиоскопией понимают радиационный контроль с применением усилителей рентгеновского изображения. Принципиальное устройство системы радиоскопии показано на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 - Схема просвечивания в радиоскопии

В качестве излучателя используется рентгеновская трубка или изотопы. Повышение контраста можно достичь предварительной фильтрацией излучения алюминием. Это нужно для того, чтобы уменьшить низкоэнергетическую часть рентгеновского излучения. Так же как и в радиографии, полезно ограничить пучок излучения с помощью коллиматоров.

Для определения качества изображения в настоящее время, так же как в радиографии, применяются миры. В радиоскопии, также как и в радиографии, всё большее значение приобретает CERL - эталон с двойными проволочками.

Так как собственная нерезкость усилителей изображения выше, чем у рентгенографических плёнок, работают обычно с прямым увеличением. При этом для обычных применений используют 2- или 3-кратное увеличение. Чтобы обеспечить ещё лучшее разрешение, т.е. небольшую геометрическую нерезкость, применяют рентгеновские трубки с маленьким фокусным пятном. Фокусное пятно таких трубок составляет 0,2-0,4 мм.

При просвечивании очень маленьких объектов работают с микрофокусными трубками и с коэффициентами увеличения 10-40. В данном случае применение усилителей рентгеновского изображения существенно целесообразнее, чем радиографических плёнок. Главным здесь является то, что можно непосредственно отслеживать точное позиционирование контролируемой детали на усилителе (преобразователе) изображения. Кроме

того, для оптимальной резкости изображения, в некоторых микрофокусных трубках требуется настройка фокусного изображения. Это можно реализовать непосредственно при наблюдении картины просвечивания.

Источники рентгеновского изображения используются исключительно совместно с телевизионной аппаратурой, т.е. изображение снимается на телекамеру. Это предоставляет преимущества для дальнейшей электронной обработки получаемого изображения и цифрового или аналогового хранения результатов. Существенное отличие между радиографией и радиоскопией состоит в том, что в системах радиоскопии картину просвечивания можно наблюдать непосредственно при облучении. В то время как рентгенографическая плёнка экспонируется в течение нескольких минут, образование изображения на усилителях изображения происходит за какую-то долю секунды, необходимую фотону для преодоления фокусного расстояния. Это подразумевает для хорошего контрастного изображения довольно большой поток фотонов, который не достигается даже при помощи изотопов с большой активностью[5].

Системы радиоскопии содержат, как правило, систему обработки изображений, которая оцифровывает получаемое на телекамере изображение и обрабатывает его в цифровом виде.

Сохраняя такие достоинства радиографии, как возможность определения характера и формы выявляемого дефекта, радиоскопия позволяет исследовать материал (изделие) непосредственно в момент его просвечивания. Методы радиоскопии основаны на просвечивании деталей (изделий) проникающим ионизирующим излучением, преобразовании радиационного изображения детали в световое или электронное изображение и передаче этих изображений на расстояние с помощью оптики или телевизионной техники с последующим анализом изображений на экране оптического устройства или телевизионного приемника [6].

При радиоскопии однородный по интенсивности поток ионизирующего излучения, пройдя через исследуемый объект с дефектами, превращается в

неоднородный поток и несет в себе скрытую информацию о дефектах объекта. Для преобразования скрытого радиационного изображения в светотеневое или электронное изображение используют явления люминесценции кристаллических веществ под действием ионизирующего излучения и фотоэффект под действием этого излучения или вызванной им люминесценции. Преобразование светотеневого или электронного изображения в электрический сигнал и воспроизведение изображения при телевизионной передаче невозможны без вторичной электронной эмиссии. В радиоскопии эти физические явления обычно используют в сочетании друг с другом.

На принципах люминесценции основано действие флуороскопических экранов, сцинтилляционных кристаллов, входных экранов электронно-оптических и других преобразователей, рабочее вещество которых (люминофор) светится под действием рентгеновского или  $\gamma$ -излучения. Люминесценцию под действием электронов используют в приемных телевизионных трубках - кинескопах, а также в электроннооптических преобразователях и усилителях изображений.

В зависимости от вида внешнего воздействия различают следующие основные виды люминесценции, применяющиеся в радиоскопии: рентгенолюминесценция, возникающая в результате взаимодействия рентгеновского или  $\lambda$ -излучения с веществом люминофора; нейтронная люминесценция, возникающая в результате взаимодействия нейтронов с ядрами атомов вещества; электролюминесценция, возникающая под действием переменного электрического поля; термолюминесценция, связанная с тепловым воздействием на тела. Люминесценция ряда веществ может быть обусловлена также воздействием на них электронов, ядер атомов -  $\alpha$ -частиц, протонов и других заряженных частиц.

В зависимости от характера взаимодействия ионизирующих излучений с веществом для их регистрации применяют различные люминофоры.

В радиоскопии преобразователями ионизирующих излучений в видимый свет служат флуороскопический экран, сцинтилляционный кристалл,

электронно-оптический преобразователь и электролюминесцентный экран. Два последних преобразователя - одновременно и усилители яркости изображений. Особое положение занимает рентген-видикон, являющийся преобразователем ионизирующих излучений в электрические сигналы. Для усиления яркости изображений применяют также электронно-оптические усилители видимого света и телевизионную технику. Изображение дефекта на преобразователе рентгеновского или  $\gamma$ - излучения создается нерассеянным излучением. Рассеянное излучение вуалирует получаемое изображение. Минимальный размер выявляемого дефекта в направлении, перпендикулярном к просвечиванию, определяется разрешающей способностью преобразователей.

Преобразователи и усилители яркости в полной мере не разрешают проблемы радиационной безопасности; ее обеспечивают телевизионные установки, которые передают рентгеновское изображение на безопасное расстояние и одновременно — позволяют усилить яркость и увеличить изображения дефектов. Для этих целей применяют промышленные телевизионные установки замкнутого типа, в которых видеосигнал передается по коаксиальному кабелю[7].

Промышленные телевизионные установки различают по типу используемых в них передающих телевизионных трубок, которые предназначены для преобразования оптического изображения в систему электрических сигналов, которые в дальнейшем передаются телевизионным каналом связи и воспроизводятся на приемной телевизионной трубке в виде оптического изображения, эквивалентного подаваемому на вход телевизионной системы.

Различают два основных вида фотоэлектрического эффекта: внешний и внутренний. Оба они характеризуются возникновением в твердом теле носителей электрического тока под действием падающего на тело излучения.

Внешним фотоэффектом называют эмиссию электронов с поверхности вещества в вакууме или газе под действием падающего на эту поверхность светового излучения. Внутренним фотоэффектом или фотопроводимостью

называют увеличение электропроводности некоторых веществ под действием электромагнитного излучения.

Суперортикон — передающая телевизионная трубка с переносом изображения и двусторонней мишенью, наиболее чувствительна к свету и поэтому предназначена для передачи оптических изображений низкой яркости. Преобразование оптических изображений в суперортиконе основано на внешнем фотоэффекте.

Видикон — передающая телевизионная трубка с фотосопротивлением. В нем преобразование оптического изображения в последовательность электрических импульсов основано на внутреннем фотоэффекте. Видикон удовлетворительно работает при сравнительно высокой яркости оптических изображений.

Установки, работающие по схеме электронно-оптический преобразователь - телевизионная система на основе суперортикона или видикона, получили распространение в промышленности.

## **1.5 Флюороскопия**

Преимуществом рентгеновских плёнок является простая доступность и возможность хранения полученных результатов. К недостаткам относятся высокая стоимость при очень частом проведении контроля, большой расход серебра и химикалий для обработки изображений, а также невозможность автоматизации радиационного контроля. Поэтому на практике всё больше находят применение другие методы получения изображений.

Одним из таких методов является применение флуоресцирующих экранов, в которых рентгеновское излучение приводит к эмиссии видимого света. Для того, чтобы получить достаточную световую интенсивность, необходима высокая интенсивность рентгеновского излучения. Один из выходов предлагает применение флуоресцентных экранов вместе с высокочувствительными телевизионными камерами, так называемыми камерами остаточного освещения (изоконами).

Флюоресцирующие экраны сегодня ещё не достигают требуемого для большинства применений в радиационном контроле качества изображений. По-другому дело обстоит с усилителями рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение падает на первичный флюоресцирующий экран, который соединён с фотокатодом (рис. 1.5). С фотокатода, в зависимости от флюоресцирующего излучения, т.е. в зависимости и от падающего рентгеновского излучения, испускаются фотоэлектроны. Эти фотоэлектроны ускоряются в ускорительной трубке при напряжении в несколько десятков кэВ и попадают на второй флюоресцирующий экран.

Это второе изображение характеризуется существенно большей силой света, чем первичное и может наблюдаться непосредственно глазами. И всё же сегодня в основном используется связь с видеокамерой. Так как возможности разрешения усилителя рентгеновского изображения лучше, чем у обычной телевизионной камеры, используются новые комбинации с высокоразрешающими видеосистемами.

Так как собственная нерезкость усилителя рентгеновского изображения выше, чем у радиографической плёнки, то с усилителями изображения работают при прямом увеличении с коэффициентом 2-3 и применяют рентгеновские трубки с очень малым фокусным пятном.

Для получения контрастного не зашумлённого изображения усилитель требует высокую интенсивность рентгеновского излучения, которой нет в распоряжении при обычном применении радиационных методов контроля. Поэтому на получаемое камерой изображение налагается шум. При использовании техники обработки изображений, в которой происходит интегрирование определённого количества видеоизображений (например, 236), можно получить контрастную и не зашумлённую картину просвечивания, отвечающую требованиям таких ответственных задач, как контроль сварных швов. Благодаря этому системы усиления рентгеновского изображения всё больше вытесняют применение радиографических плёнок. Совместно с использованием телевизионных камер и обработкой изображений, получают

оцифрованное изображение, которое может в дальнейшем обрабатываться на компьютере и храниться в виде файла.

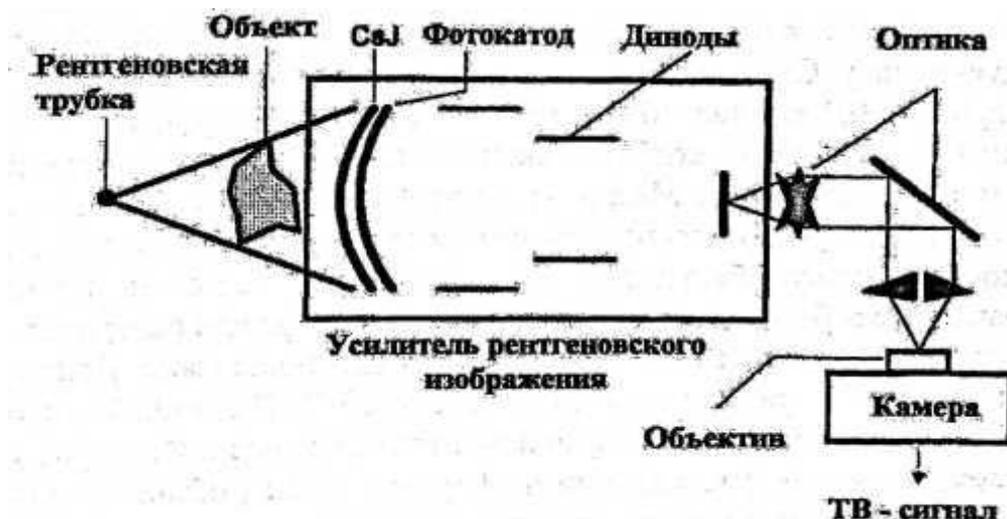


Рисунок 1.5 - Принцип работы усилителя рентгеновского изображения

Недостатком усилителей рентгеновского изображения является то, что они имеют относительно малые размеры входного экрана. Поэтому многочисленные схемы контроля невозможно или очень трудно реализовать с их помощью. Альтернативной возможностью являются флюоресцентные экраны. Они обладают большей собственной нерезкостью, чем усилители изображения. При их использовании необходимо учитывать это ухудшение качества изображения.

Во-вторых, флюоресцентные экраны требуют сравнительно мощные потоки частиц для получения достаточно высокой оптической плотности, т.е. требуются соответствующие сильные рентгеновские источники, допускающие очень высокие анодные токи. Флюоресцентные экраны также применяют совместно с видеосистемами и системами обработки изображений. Из-за относительно низкой оптической плотности флюоресцирующих экранов имеет смысл применение очень чувствительных телевизионных камер, так называемых камер остаточного света (изоконов, кремниконов и др.). Чтобы исключить облучение телекамеры, можно рассматривать флюоресцентный экран в зеркало [8]

## 1.6 Радиометрия

Сущность метода заключается в просвечивании объекта, путем его сканирования, коллимированным пучком излучения и последующем преобразовании, детектором прошедшего излучения, в электрический сигнал (рис. 1.7)

Радиометрия - это метод радиационного неразрушающего контроля, основанный на измерении одного или нескольких параметров ионизирующего излучения после его взаимодействия с ОК.

Под параметрами здесь понимаются параметры взаимодействия ионизирующих излучений со средой: экспозиционная доза, доза излучения и т.п., а также такие характеристики излучений и их полей, как плотность потока частиц, потока энергии частиц, энергетический спектр частиц и т.п.

По физическому принципу получения информации о характеристиках ОК радиометрический контроль может быть основан на измерении параметров прошедшего ОК излучения (рис. 1.6) и измерении параметров рассеянного ОК излучения (рис. 1.7).

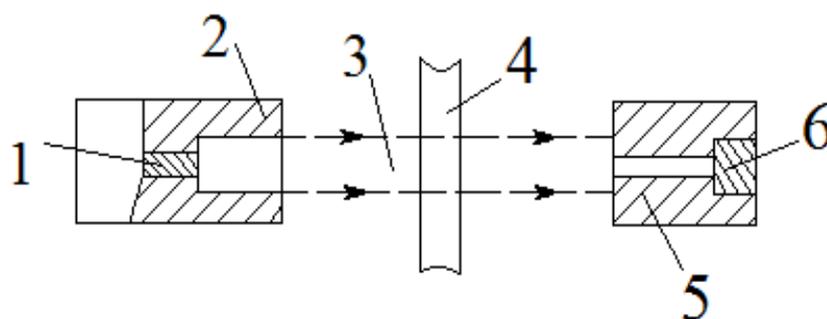


Рисунок 1.6 - Схема радиометрического контроля с использованием прошедшего ОК первичного излучения: 1 - источник излучения; 2 - радиационная защита источника с его коллиматором; 3 - рабочий пучок излучения; 4 - ОК; 5 - коллиматор детектора; 6 - детектор

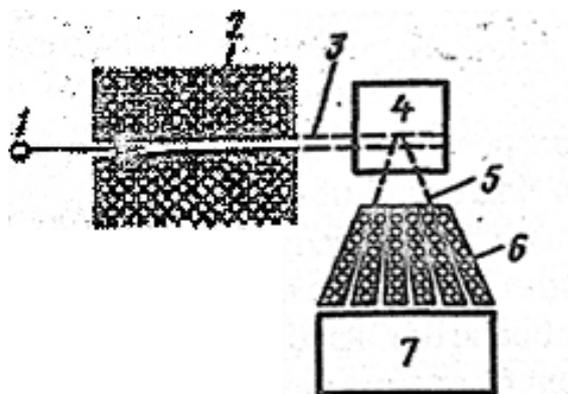


Рисунок 1.7 - Схема радиометрического контроля с использованием рассеянного ОК излучения: 1 - источник излучения; 2 - коллиматор источника; 3 - рабочий пучок излучения; 4 - ОК; 5 - пучок рассеянного ОК излучения; 6 - коллиматор детектора; 7 - блок детектирования

Радиометрический контроль включает в себя самые разнообразные методы измерения ионизирующих излучений: ионизационный, сцинтилляционный, оптический, метод счета ионизирующих частиц и др. При этом могут использоваться различные виды излучения: рентгеновское, гамма, бета, нейтронное, положительные ионы и др.

Источником излучения в радиометрическом контроле в основном служат радиоактивные источники. В качестве блока детектирования могут быть использованы ионизационные камеры, газоразрядные счетчики, полупроводниковые и сцинтилляционные детекторы. Сцинтилляционные детекторы получили наибольшее распространение благодаря высокой эффективности регистрации излучения и большим предельным допустимым нагрузкам.

В случае сцинтилляционного детектора часть фотонов из коллимированного пучка излучения может пройти сцинтиллятор, например, монокристалл NaI(Tl), без взаимодействия, потерять в кристалле часть своей энергии и выйти из него или, наконец, потерять всю свою энергию. Поглощенная часть энергии фотонов преобразуется в сцинтилляторе в световую вспышку, которая с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) преобразуется в электрический сигнал. Амплитуда импульса напряжения на

выходе ФЭУ характеризует долю поглощенной энергии фотонов. По своему распределению одна часть импульсов определяется вкладом комптоновского, другая - фотоэлектрического поглощения (фотопик).

Для моноэнергетического первичного излучения фотопик означает регистрацию фотонов, не провзаимодействовавших с объектом, но полностью поглощенных сцинтиллятором. Комптоновская часть означает регистрацию фотонов, рассеянных в объекте и поглощенных в веществе сцинтиллятора. Для немонаэнергетического первичного излучения распределение импульсов с ФЭУ носит более сложный характер.

Обработка сигнала производится электронными средствами с целью выделения информации о контролируемом параметре. Полный сигнал, кроме этой полезной информации, несет в себе составляющие сигнала, соответствующие изменениям формы (толщины) самого контролируемого объекта.

Выходными регистрирующими устройствами могут быть как показывающие приборы (миллиамперметр, счетчик импульсов, осциллограф), так и записывающие (с документированием результатов контроля): самопишущие потенциометры или перфораторы и цифропечатающие устройства - в случае использования в канале обработки сигнала вычислительных машин [1].

По характеру измеряемой величины различают радиометрическую дефектоскопию и толщинометрию. Отличия дефектоскопии от толщинометрии обусловлены различным характером решаемых ими задач:

- Из-за локального расположения и малых размеров дефектов требуется быстродействующая регистрирующая аппаратура, в то время как для плавных изменений толщины возможно усреднение сигналов. Кроме того, дефект на мгновение перекрывает канал коллиматора и сигнал от него на выходе детектора не является прямоугольным.

- В дефектоскопии размеры канала коллиматора определяются размером минимально выявляемых дефектов. Поэтому для обеспечения

одинаковой чувствительности метода в дефектоскопии и толщинометрии в первом случае требуется больший поток излучения.

- Радиометрический дефектоскоп работает на основе постоянного сравнения дефектного и соседнего с ним объемов объекта, сканируемых последовательно во времени, и поэтому требуются непрерывные измерения, в толщиномерах возможны дискретные измерения по сравнению с эталоном и получение результатов в абсолютных значениях. Эти различия приводят к тому, что чувствительность радиометрического метода в толщинометрии выше, чем в дефектоскопии.

По физическому принципу получения информации о контролируемом параметре объекта выделяют две группы методов: основанные на регистрации прошедшего через объект излучения (просвечивание) и основанные на регистрации рассеянного в объекте и вышедшего из него под различным углом излучения.

По способу выделения полезной информации - сигнала, вызванного недопустимыми изменениями в контролируемом объекте, различают методы подавления сопутствующего сигнала, устранения вклада рассеянного излучения, выделения полезного сигнала из шума. Каждый из этих методов может реализоваться благодаря конструктивным и схемным решениям. Конструктивное решение обеспечивается изменением или введением в конструкцию радиометрического дефектоскопа нового узла. Схемное решение обеспечивается специальным построением электронной (электрической) схемы регистрирующего тракта или введением дополнительных электронных блоков обработки сигнала. Как правило, используется сочетание конструктивных и схемных решений [9].

По форме представления информации различают дискретный (счетный) и аналоговый методы.

Дискретный метод заключается в счете числа импульсов на выходе детектора. Для этого импульсы с детектора сначала нормализуются с помощью формирователя, а затем поступают на пересчетное устройство (рис. 1.8, а).

Время измерения, за которое регистрируется число импульсов, может регулироваться с помощью задания интервалов времени. Если схемой формируются сигналы, величина которых пропорциональна амплитуде импульсов с детектора, и на пересчетное устройство с помощью дискриминатора поступают сигналы, отвечающие, например, только фотопику, то это - счетно-спектрометрическая схема (рис. 1.8, б), представляющая собой вариант дискретного метода. Эта схема позволяет устранить вклад рассеянного излучения, низкоэнергетические шумы ФЭУ.

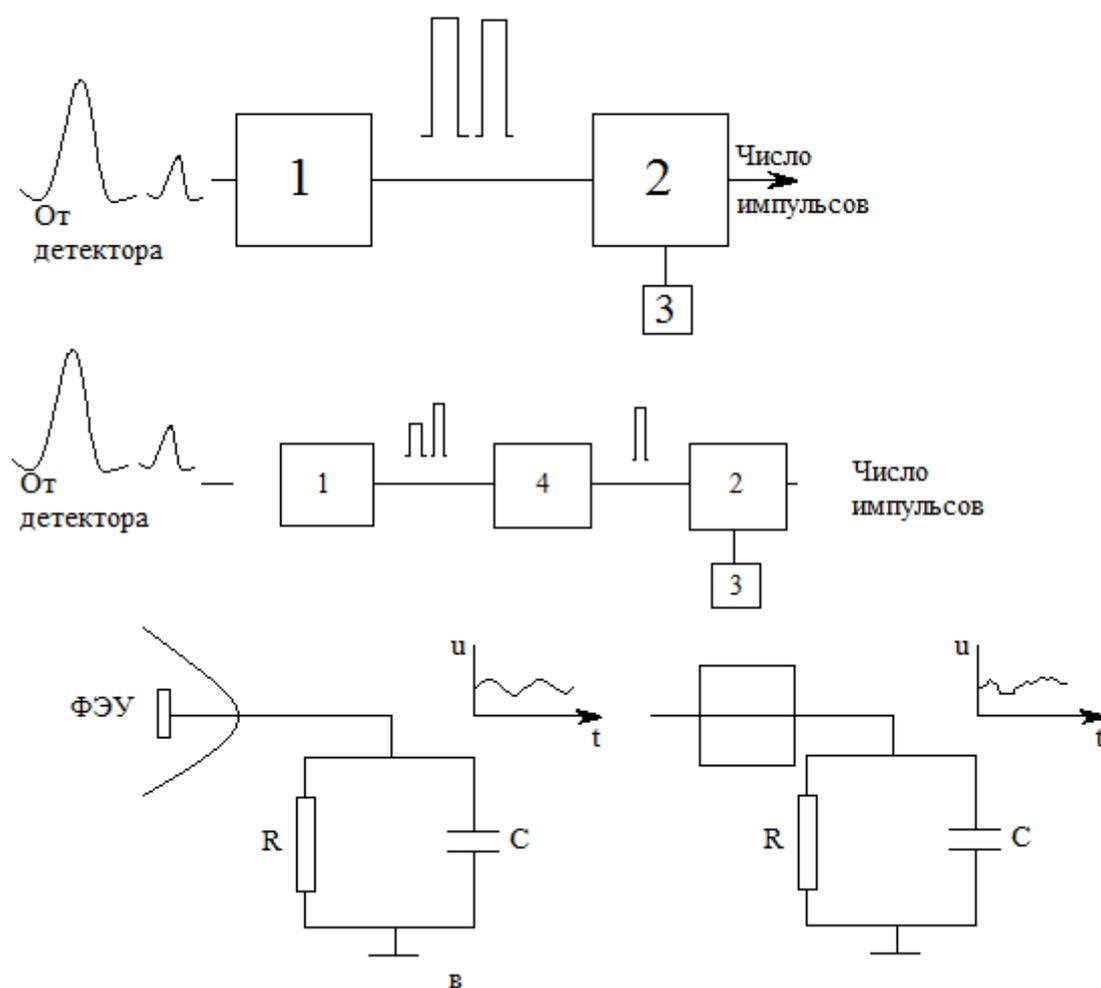


Рисунок 1.8 - Счетная (а), счетно-спектрометрическая (б), аналоговая (в) и аналоговая нормализацией импульсов тока (г) схемы регистрации: 1 - формирователь импульсов напряжения; 2 - пересчетное устройство; 3 - датчик интервалов времени; 4 - амплитудный дискриминатор; 5 - формирователь импульсов тока

При аналоговом методе регистрации измеряется суммарный заряд детектора. Для этого импульсы с детектора поступают на RC-цепочку-простейший интегратор тока (рис. 1.8, в). Чтобы уменьшить флуктуации напряжения на интегрирующей ячейке, обусловленные отклонением амплитуды импульсов тока, соответствующих различным зарегистрированным фотонам, вводят формирователь импульсов (рис. 1.8, г). Выбор метода представления информации обусловлен быстродействием прибора или системы радиометрического контроля, погрешностью, числом каналов, выходным устройством для анализа и дешифрирования результатов контроля.

По виду используемого ионизирующего излучения различают рентгеновские, радиоизотопные и бетатронные (ускорительные) приборы и системы радиометрического контроля.

### **1.7 Области применения радиометрического метода НК**

Сфера использования этого метода включает широкий круг задач контроля, начиная от прецизионного измерения толщины покрытий и кончая определением качества стволов деревьев. Ранее в большинстве случаев радиометрия была связана с определением толщины, плотности и состава ОК, а не с формированием изображений их внутренней структуры. Однако в настоящее время, в связи с широким использованием в НК цифровых методов обработки сигналов и методов сканирования ОК пучками ионизирующих излучений, радиометрия позволяет создавать трехмерные или объемные изображения распределения плотности материала внутри ОК. Качество сформированного изображения зависит от геометрии просвечивания ОК и общего числа измерительных данных. При формировании изображений для небольших ОК разрешение в 0,5 мм требует около миллиона измерений. Для ОК диаметром 2 м необходимо около 150 миллионов измерений. Вследствие того, что радиометрия включает большое число различных методов контроля (табл. 1.2), в этой главе многие методы будут рассматриваться только в общих чертах. Основное внимание будет уделено методу, основанному на регистрации

ослабления пучков рентгеновского и гамма-излучения при их прохождении через ОК.

Таблица 1.2 - Области применения радиометрического метода НК

Области применения	Процедуры анализа излучения
Дефектоскопия Абсорбционная толщинометрия, плотнометрия	Измерение излучения после прохождения его через ОК
Концентратометрия	Измерение излучения по крайней мере, с двумя уровнями средней энергии его частиц после прохождения их через ОК
Дефектоскопия Альбедная радиометрия и толщинометрия	Измерение вторичного обратного рассеянного излучения от ОК
Эмиссионная радиационная толщинометрия, концентратометрия	Измерение вторичного ионизирующего излучения, возникающего в ОК
Вычислительная томография	Измерение излучения после прохождения его через ОК с последующим формированием изображения
Радиоаквационный анализ	Регистрация и анализ ионизирующего излучения от наведенной в ОК радиоактивности

С помощью такой регистрации можно локально оценивать произведение плотности  $\rho$  материала ОК на его толщину  $V$ , т.е.  $\rho x$ . Во многих случаях, предполагая постоянство химического состава и плотности, этим методом измеряют толщину лент, полос и т.п. И наоборот, при неизменной толщине определяют плотность материала ОК.

В радиационной толщинометрии часто используются  $\beta$ - частицы, так как степень их рассеяния увеличивается при возрастании атомного номера материала ОК. Так, при увеличении толщины покрытия от нуля до некоторого значения параметры обратного рассеяния вначале определяются основным материалом ОК, а затем материалом покрытия. Промежуточные значения

указанных параметров можно калибровать по толщине покрытия. Чувствительность рассматриваемого метода повышается при увеличении разности между атомными номерами покрытия и подложки. Вторичное обратное рассеянное объектом контроля излучение может быть использовано и для создания изображений, в которых содержится информация о качестве облучаемого ОК [10].

## 2 Исследование радиометрического дефектоскопа

### 2.1 Сцинтилляционные $\gamma$ -спектрометры

Гамма-спектрометры имеют большую эффективность и находят применение в тех случаях, когда нет высоких требований к энергетическому разрешению [11]. В области энергий фотонов 100 кэВ-10 МэВ энергетическое разрешение этих приборов лежит в пределах от 15 до 4 %. В однокристалльных сцинтилляционных спектрометрах функция отклика  $G(E, V)$  имеет довольно сложный вид, и поэтому не всегда надежно удается определить спектр фотонов по измеренным амплитудным распределениям. Главным образом по этой причине разработано много различных многокристалльных спектрометров, позволяющих получить функцию отклика  $G(E, V)$ , близкую к идеальной. Эффективность многокристалльных спектрометров обычно меньше эффективности однокристалльных.

Многокристалльные сцинтилляционные спектрометры уже потеряли свою практическую ценность, однако основные идеи, заложенные в эти приборы, представляют интерес и в настоящее время, так как некоторые из них используются с более совершенными полупроводниковыми детекторами.

#### Однокристалльные сцинтилляционные $\gamma$ -спектрометры

В однокристалльных сцинтилляционных спектрометрах используются кристаллы самых различных форм и размеров в зависимости от целей исследований [12]. В целом с ростом размеров кристаллов улучшается форма функции отклика и ухудшается энергетическое разрешение. В ядерной физике средних энергий (энергии фотонов  $E_\gamma \leq 10$ ) наиболее оптимальны кристаллы NaI(Tl) диаметром и высотой около 80 мм. С такими кристаллами энергетическое разрешение равно 5-7 % в области энергий фотонов 1-10 МэВ. Для однокристалльного спектрометра одна из важнейших характеристик - функция отклика, которая имеет сложную форму из-за нескольких взаимодействий, в результате которых появляются электроны.

Типичные распределения амплитуд импульсов, полученные для кристалла NaI(Tl) диаметром и высотой 76 мм, показаны на рис. 2.1 при

облучении кристалла коллимированным пучком моноэнергетического  $\gamma$ -излучения.

В амплитудных распределениях при энергии фотонов ниже 5-6 МэВ наблюдается пик полного поглощения, обусловленный фотоэлектрическим поглощением фотонов и их многократным комптоновским рассеянием с последующим поглощением. В пик полного поглощения вносит вклад и эффект образования пар при условии, что оба аннигиляционных фотона поглощаются в кристалле.

Между непрерывным распределением, обусловленным комптоновским рассеянием, и пиком полного поглощения имеется провал, связанный с тем, что при однократном рассеянии фотон не может передать всю свою энергию электрону. Расстояние между пиком полного поглощения и границей комптоновского распределения составляет  $E_\gamma/(1+2E_\gamma/m_0c^2)$  (т.е. не более 250кэВ)

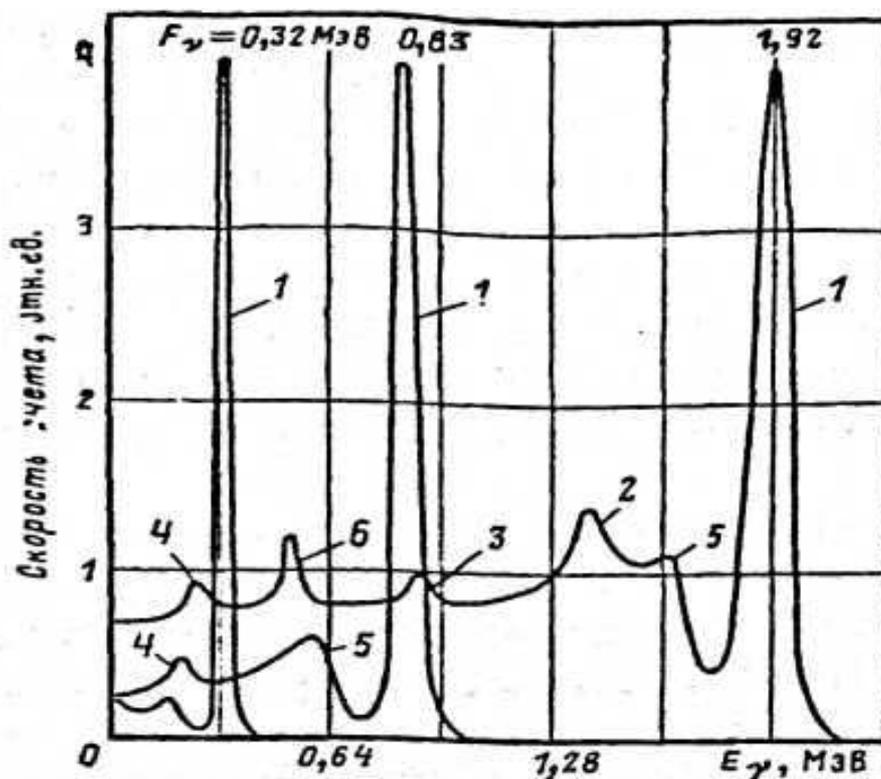


Рисунок 2.1 - Амплитудное распределение импульсов для кристаллов NaI(Tl) диаметром и высотой 76 мм, измеренное с источниками  $\gamma$ -излучения: 1 - фотопик; 2 - пик, обусловленный эффектом рождения пар; 3 - **то** же, при

утечке двух аннигиляционных фотонов; 4—пик, связанный с поглощением от ФЭУ фотонов; 5—граница комптоновского распределения; 6 - пик аннигиляционного излучения

Чем выше энергия фотонов, тем больше абсолютный разброс по амплитудам импульсов. Поэтому с ростом энергии пик полного поглощения начинает перекрываться с непрерывным комптоновским распределением. С ростом энергии все большее значение приобретает эффект образования пар, в результате которого образуются электрон и позитрон с суммарной энергией  $E_\gamma - m_0c^2$ . При аннигиляции позитрона образуются два фотона с энергией  $m_0c^2=0,51$  МэВ каждый. Эффект образования пар приводит к появлению еще двух пиков в амплитудном распределении импульсов. Эти пики отстоят от пика полного поглощения в шкале энергий на 0,51 и 1,02 МэВ. Первый из них связан с утечкой обоих аннигиляционных фотонов из кристалла, а второй — одного аннигиляционного фотона. При росте энергии излучения все три пика, в конце концов, сливаются в один. Функции отклика  $G(E, V)$  на этом рисунке довольно сложны, и это затрудняет получение спектров  $\gamma$ -излучения по измеренным амплитудным распределениям импульсов. Функции отклика принимают более простой вид, если увеличить размеры кристаллов. Этому же способствует применение коллиматоров, которые позволяют выделить узкий пучок фотонов и направить его в центр кристалла [13].

При измерениях спектров фотонов с помощью однокристалльного сцинтилляционного спектрометра основная проблема заключается в преобразовании амплитудного распределения импульсов в энергетические спектры, т.е. в решении интегрального уравнения. Для этого с особой тщательностью следует определить функции отклика детектора  $G(E, V)$  [14].

Функцию отклика детектора  $G(E, V)$  определяют расчетным и экспериментальным путем. Расчеты выполняют методом Монте-Карло, который позволяет достаточно уверенно предсказывать функцию отклика. Экспериментальное определение функции отклика дает возможность откорректировать расчетные данные, особенно в области малых амплитуд

импульсов, где погрешность расчета обычно наибольшая. В области энергий фотонов ниже 3 МэВ имеется достаточное количество удобных источников ионизирующего моноэнергетического излучения. При более высокой энергии обычно используют реакции  $^{11}\text{B}(\rho, \gamma)$ ,  $^{19}\text{F}(\rho, \alpha\gamma)$ ,  $^{27}\text{Al}(\rho, \gamma)$ ,  $^7\text{Li}(\rho, \gamma)$ , которые дают возможность получить моноэнергетическое  $\gamma$ -излучение с энергией до 17,6 МэВ.

Экспериментальное определение  $G(E, V)$  сводится к измерению амплитудных распределений импульсов спектрометра с различными источниками фотонов, внесению поправок в измеренные распределения на рассеяние фотонов в источнике и окружающих его предметах, на тормозное излучение, образующееся в источнике, и т.д. Полученные амплитудные распределения иногда нормируют с учетом эффективности спектрометра, т.е. требуют, чтобы  $\int G(E, V) dV = \varepsilon(E)$  где  $\varepsilon(E)$  - эффективность сцинтилляционного счетчика.

Эффективность и ряд поправок можно рассчитать с достаточной точностью, поэтому для определения функций отклика не требуются источники с известной активностью, т.е. можно проводить относительные измерения.

Использование неорганических кристаллов, таких как  $\text{NaI(Tl)}$  и  $\text{CsI(Tl)}$ , не всегда возможно, если исследуемое  $\gamma$ -излучение сопровождается нейтронами. Нейтроны, поглощаясь в йоде (сечение радиационного захвата нейтронов с энергией около 100 кэВ равно приблизительно  $10^{-25}\text{см}^2$ ), создают фотоны, энергия которых лежит в области до 6 МэВ. Кроме того, нейтроны с энергиями выше 0,5 МэВ при неупругом рассеянии также образуют фотоны, а сечение рассеяния достигает примерно  $10^{-24}\text{см}^2$ , т.е. сравнимо с сечением взаимодействия фотонов с атомами. Поэтому неорганические кристаллы практически нельзя использовать для спектрометрии фотонов, если они сопровождаются нейтронами, потоки которых сравнимы с потоками фотонов.

Спектральный состав  $\gamma$ -излучения при большом нейтронном фоне можно изучать с помощью сцинтилляционных спектрометров с органическими кристаллами (например, со стильбеном).

$$T_{\text{пр}} = e^{-\mu_{\text{опт}}x}, \quad (4)$$

где  $\mu_{\text{опт}}$  -коэффициент оптического поглощения самого сцинтиллятора;  
 $x$  - длина пути, пройденная фотоном света в сцинтилляторе.

Путь, проходимый фотоном света в сцинтилляторе, обычно больше, чем толщина кристалла  $d$ , поскольку часть фотонов может испытать последующее полное отражение, прежде чем попадет на фотокатод.

Для большинства сцинтилляторов спектры поглощения и испускания частично перекрываются, в результате чего часть испускаемых фотонов с длиной волны, соответствующей области перекрытия, поглощается в самом сцинтилляторе. Коэффициент поглощения  $\mu$  изменяется при изменении длины волны испускаемого излучения. Однако для лучших органических сцинтилляторов и в частности, для йодистого натрия коэффициент  $\mu_{\text{опт}}$  мал (0,002-0,008) для большей части спектра излучения, поэтому такие сцинтилляторы можно делать значительной толщины.

Процесс высвечивания под действием излучений явление сложное. Как правило, кривая зависимости интенсивности сцинтилляций от времени может быть представлена в виде суммы нескольких экспонент сцинтилляций. Однако приближенно для некоторых сцинтилляторов, например для NaI(Tl), процесс высвечивания можно описать одной экспонентой, приведенной в формуле:

$$J = J_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

где  $J_0$ — начальная интенсивность сцинтилляции;  $J$ - интенсивность сцинтилляции в момент времени  $t$ ;  $\tau$ — время, в течение которого интенсивность сцинтилляции уменьшается в  $e$  раз.

Если процесс высвечивания описывается одной экспонентой, то  $\tau$  называют постоянной времени высвечивания. Если же при описании процесса несколько экспонент со своими постоянными времени высвечивания заменяются одной с некоторым значением  $\tau_{\text{эфф}}$ , то говорят об эффективном времени высвечивания.

К настоящему времени создано и исследовано большое количество

сцинтилляторов, однако лишь немногие из них удовлетворяют требованиям спектрометрии. Наибольшую практическую ценность представляют щелочно-галоидные кристаллы NaI и CsI, активированные таллием, и кристаллы LiI, активированные Eu, Tl или Sn. Из органических кристаллов наиболее широкое применение получили стильбен, антрацен, а также пластические и жидкие сцинтилляторы [15].

## **2.2 Радиометрический дефектоскоп РД-30РМ**

Радиометрический дефектоскоп РД-30РМ предназначен для непрерывного дистанционного измерения бесконтактным способом неоднородности полимерных материалов, обнаружения локальных дефектов и определения их плотности и размеров [16].

### **ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ**

1.1. Дефектоскоп РД-30РМ позволяет контролировать изделия толщиной от 150 до 600 мм, что в пересчёте на алюминиевый эквивалент составляет от 100 до 400 мм.

1.2. Рабочий диапазон плотностей контролируемого материала от 1000 до 2000 кг/м<sup>3</sup>.

1.3. Относительная чувствительность дефектоскопа при отношении сигнал/шум, равным трём, не менее 1% от средней толщины-плотности контролируемого объекта.

1.4. Постоянная времени измерительной схемы дефектоскопа 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 с.

1.5. Дрейф «нуля» дефектоскопа за 5ч. непрерывной работы в статическом режиме не более 0,5 % от среднего значения толщины-плотности контролируемого изделия.

1.6. Предел допустимой дополнительной погрешности за счёт изменения напряжения питания общей сети на 10% не превышает 0,1%.

1.7. Дефектоскоп выдаёт на выход для подключения аналогового регистрирующего устройства (самопишущий потенциометр) напряжение от 0

до 100 мВ.

1.8. Регистрация результатов контроля осуществляется:

- в цифровом виде на экране монитора в виде А-скана в реальном времени с возможностью измерения и вывода на экран координат дефекта в изделии, лучевого размера дефекта, численного значения толщины-плотности на луче, процентного отклонения толщины-плотности на луче от среднего значения;

- в цифровом виде в журнале контроля изделия;

- в аналоговом виде на ленте самописца в реальном времени в виде процентного отклонения толщины-плотности от среднего значения с регулируемым масштабом.

1.9. Дефектоскоп обеспечивает свои характеристики при использовании источников излучения  $Co^{60}$  активностью от 10 до 50 Ки.

1.10. В дефектоскопе использованы высокоэффективные коллиматоры из вольфрама. Эффективность ослабления при длине 100 мм не менее  $2 \cdot 10^{-5}$ .

1.11. Дефектоскоп обеспечивает свои технические характеристики в пределах норм после времени самопрогрева 0,5 ч.

1.12. Дефектоскоп обеспечивает свои технические характеристики в пределах норм в течение 24 ч. непрерывной работы.

1.13. Питание дефектоскопа осуществляется от сети переменного тока (220

$\pm 22$ ) В, частотой ( $50 \pm 0,5$ ) Гц и содержанием гармоник до 5%.

1.14. Электрическая изоляция цепи сетевого питания относительно корпуса дефектоскопа не менее 20 МОм.

1.15. Максимальная мощность, потребляемая дефектоскопом при номинальном напряжении сети, не более 50 ВА.

1.16. Вероятность безотказной работы за 1000 ч. не ниже 0,95.

1.17. Масса дефектоскопа не более:

Блок сцинтилляционного детектора 1 кг;

Блок измерительной аппаратуры 10 кг.

## 2.3 Устройство и работа прибора

Принцип действия прибора основан на преобразовании прошедшего через объект гамма-излучения в электрический сигнал, пропорциональный толщине-плотности изделия с последующей нормировкой величины отклонения сигнала от среднего значения [17]. Измерительная аппаратура дефектоскопа состоит из двух блоков: блока сцинтилляционного детектора (БСД) и блока обработки информации (БОИ). Структурная схема БСД приведена на рисунке 2.2.

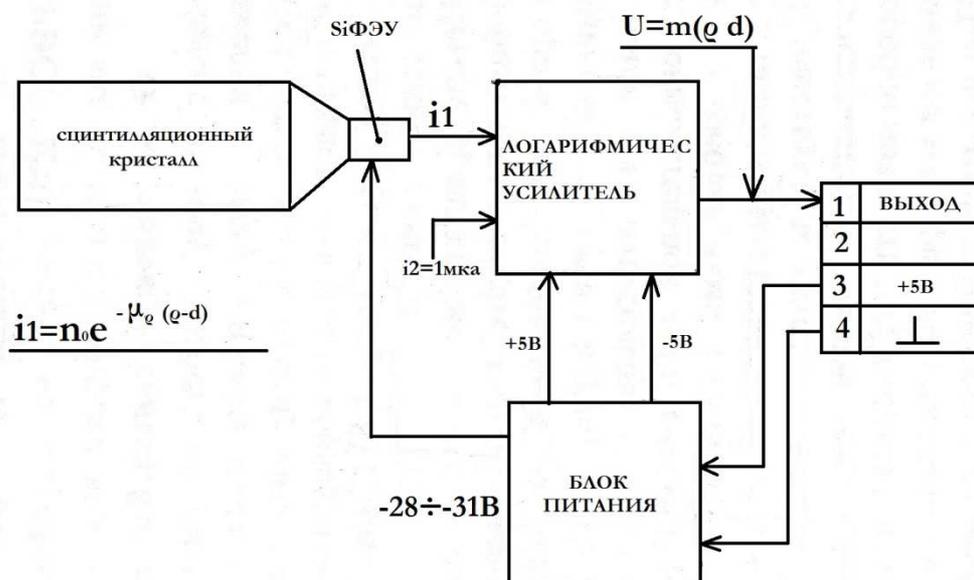


Рисунок 2.2 - Структурная схема блока сцинтилляционного детектора

Сцинтилляционный кристалл размером  $\varnothing 100 \times 100$  мм. предназначен для преобразования потока гамма-квантов, прошедших через объект контроля, в пропорциональный ему поток световых импульсов, а затем, с помощью кремниевого фотоумножителя (Si ФЭУ), в электрический ток. Использование кремниевого ФЭУ исключает влияние как внешних магнитных полей так и земного магнитного поля. С выхода SiФЭУ ток  $i_1$  поступает на первый вход логарифмического усилителя, на второй вход которого подаётся управляющий ток  $i_2$ . Динамический диапазон логарифмирующего усилителя составляет 7 десятичных порядков. На выходе логарифмирующего усилителя формируется

напряжение, пропорциональное толщине-плотности изделия на луче просвечивания. Сигнал с БСД по кабелю поступает на БОИ, рисунок 2.3.

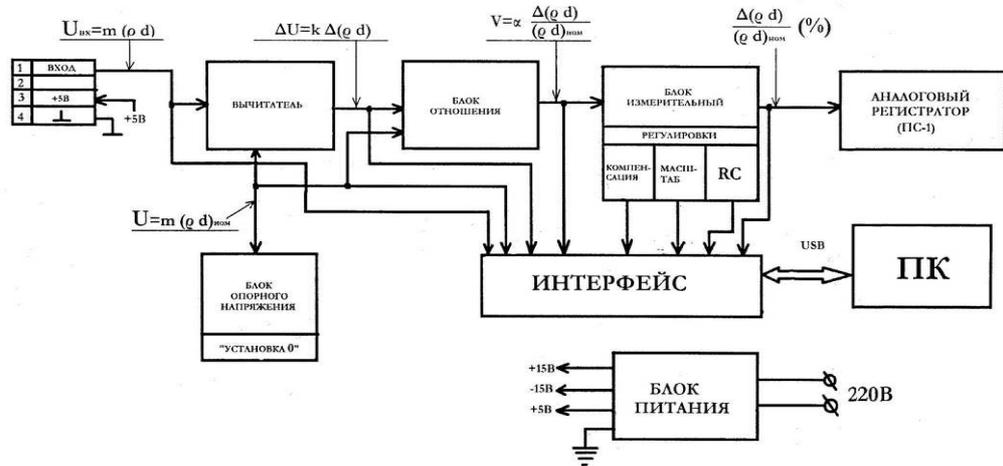


Рисунок 2.3 – Структурная схема дефектоскопа РД-30 РМ

Напряжение с БСД, пропорциональное толщине-плотности в точке просвечивания поступает в вычитатель, где из него вычитается напряжение, формируемое в блоке опорного напряжения, пропорциональное номинальному значению толщины-плотности  $U_{ном} = m(\rho d)_{ном}$ . На выходе вычитателя формируется отклонение от номинала  $\Delta U = k \Delta(\rho d)$ . Отклонение толщины-плотности ( $\rho d$ ) нормируется на  $(\rho d)_{ном}$  в блоке отношений. В блоке измерительном производится сглаживание сигнала и формируется результат измерения в процентах для регистрации на аналоговом регистраторе и для преобразования в аналоговый сигнал, выводимый на монитор в виде непрерывной записи – дефектограммы. С помощью блока интерфейса на компьютер выводятся напряжения с основных точек схемы, что позволяет непрерывно отслеживать работоспособность основных узлов дефектоскопа и выполнять операции:

- оперативное отображение результатов контроля;
- хранение данных контроля в файле контроля каждого изделия;

- масштабирование дефектограмм;
- выбор зоны интереса на дефектограмме и анализ временных (координатных) и амплитудных параметров регистрируемых отклонений толщины-плотности от номинала;
- цифровая фильтрация дефектограмм для выделения границ дефектов;
- вывод на экран нескольких участков дефектограмм для совместного анализа;
- оформление журналов контроля.

Конструктивно БСД и БОИ соединены кабелем, длиной до 20 м.

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока 220 В.

#### **2.4 Физические процессы, возникающие в сцинтилляторах под действием излучений**

Заряженная частица, проходя через кристалл-сцинтиллятор, теряет в нем свою кинетическую энергию на ионизацию и возбуждение атомов и молекул вещества сцинтиллятора [4]. При этом в сцинтилляторе может быть поглощена либо вся энергия  $E$  частицы, либо только доля её —  $\Delta E$  (очевидно, что  $A \leq 11$ ). Часть энергии вновь излучается в виде свечения возбуждения и свечения рекомбинации. Величина  $\Delta E$  зависит от отношения толщины сцинтиллятора  $dk$  длине максимального пробега  $g$  частицы в нем. Длина пробега зависит от природы и энергии поступающей в сцинтиллятор частицы и от тормозной способности сцинтиллятора. Тормозная способность является функцией плотности, порядкового номера и атомного веса элементов, входящих в состав сцинтиллятора [19].

Рентгеновские лучи,  $\gamma$ -лучи и нейтроны сами непосредственно не производят ионизации. Эти излучения в результате взаимодействия с веществом сцинтиллятора теряют либо часть, либо всю свою энергию на образование вторичных заряженных частиц (электроны, позитроны, ядра отдачи), энергия которых в дальнейшем расходуется на ионизацию и

возбуждение атомов и молекул вещества сцинтиллятора.

При облучении сцинтиллятора заряженными частицами каждая частица, вошедшая в сцинтиллятор, теряет в нем или часть, или всю свою энергию и регистрируется. Поэтому в принципе эффективность регистрации заряженных частиц сцинтиллятором равна 100%. В случае же облучения сцинтиллятора потоком  $\gamma$ -квантов (или нейтронов) только некоторая часть  $\varepsilon$   $\gamma$ -квантов (или нейтронов), попавших в сцинтиллятор, поглощается в нем и образует заряженные частицы. Для параллельного пучка  $\gamma$ -излучения, падающего на сцинтиллятор нормально к его поверхности, эта часть, представляющая собой эффективность регистрации излучения сцинтиллятором, будет описываться формулой:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\mu_{\text{опт}}d}, \quad (6)$$

где  $\mu_{\text{опт}}$  — коэффициент поглощения данного излучения в сцинтилляторе;  $d$  — толщина сцинтиллятора.

Коэффициент поглощения данного излучения в сцинтилляторе описывается формулой:

$$\mu = \tau + \sigma + \chi, \quad (7)$$

где  $\tau$  — линейный коэффициент фотоэлектрического поглощения  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $\sigma$  — линейный коэффициент комптоновского взаимодействия,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $\chi$  — линейный коэффициент эффекта образования пар,  $\text{м}^2/\text{кг}$ .

Для расчета коэффициентов поглощения  $\gamma$ -лучей определенной энергии в каком-либо веществе могут быть использованы следующие приближенные соотношения:

$$\tau = \left( \frac{\tau_0 A_0}{\rho_0 Z_0^{4,1}} \right) \frac{\rho Z^{4,1}}{A}, \quad (8)$$

$$\sigma = \left( \frac{\sigma_0 A_0}{\rho_0 Z_0} \right) \frac{\rho Z}{A}, \quad (9)$$

$$\chi = \left( \frac{\chi_0 A_0}{\rho_0 Z_0^2} \right) \frac{\rho Z^2}{A}, \quad (10)$$

где  $\rho_0$ ,  $Z_0$ ,  $A_0$  - плотность, атомный номер и атомный вес какого-либо элемента, коэффициенты поглощения которого известны, например алюминия или свинца  $\rho$ ,  $Z$ ,  $A$  — соответственно, те же параметры неизвестного поглотителя.

В сложных веществах коэффициенты поглощения различных атомных компонентов складываются. Для йодистого натрия поглощение обусловлено в основном йодом (составляющим 85 % веса кристалла).

В антрацене, стильбене и других органических сцинтилляторах, благодаря малой плотности и малому эффективному атомному номеру веществ, фотоэффект заметен лишь в области энергий, меньших 0,5 МэВ, а эффектом образования пар можно пренебречь вплоть до энергии  $\gamma$ -излучения 5 МэВ. Отсюда следует, что органические сцинтилляторы являются практически чистыми комптоновскими рассеивателями в широком диапазоне энергий.

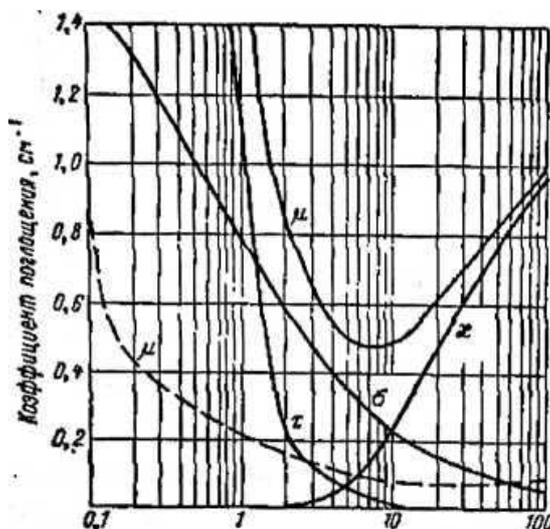


Рисунок 2.4 - Коэффициенты поглощения  $\gamma$ -излучения в свинце (сплошная линия) и в алюминии (пунктирная линия)

В случае тяжелых кристаллов-сцинтилляторов, когда возможны все три процесса взаимодействия, картина значительно сложнее. На рис.2.5 приведена схематическая диаграмма процессов взаимодействия квантов с веществом кристалла сцинтиллятора и окружающей кристалл свинцовой защиты.

Доля энергии, переданная вторичному электрону, зависит от вида взаимодействия. При фотоэлектрическом поглощении вся энергия первичного

$\gamma$ -кванта передается выбитому из атома электрону и возникающему при этом кванту рентгеновского излучения, энергии которых в основном поглощаются в самом сцинтилляторе. При возникновении рентгеновского излучения вблизи поверхности кристалла возможна утечка его из кристалла.

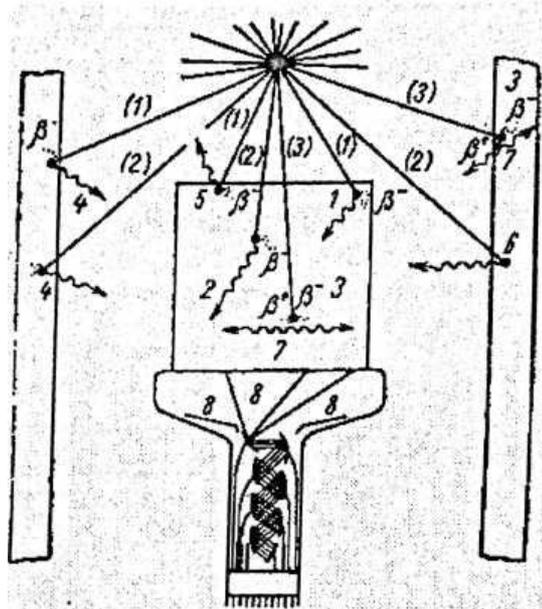


Рисунок 2.5 - Схематическая диаграмма взаимодействия гамма-излучения с веществом кристалла - сцинтиллятора и окружающей его свинцовой защитой: 1 - фотоэлектрическое взаимодействие; 2 - комптоновское взаимодействие; 3 - образование пар; 4—характеристические рентгеновские лучи, возникающие в К-оболочках свинца; 5 - характеристические рентгеновские лучи, возникающие в К-оболочках йода; 6 - тормозное излучение; 7 - аннигиляционные фотоны; 8 - фотоэлектроны с фотокатода

Электроны, возникающие в процессе комптоновского рассеяния, обладают непрерывным энергетическим спектром в интервале энергий от  $E_k=0$  до  $E_k=E_{kmax}$ , причем  $E_k$  описывается формулой:

$$E_k = \frac{E_{пер}}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_{пер}}} \quad (11)$$

где  $m_0 c^2 = 0,51$  МэВ;  $m_0$  - масса покоя электрона;  $E_{пер}$  - энергия первичных квантов.

При этом первичный квант, испытавший комптоновское рассеяние и потерявший часть своей энергии, может выйти за пределы сцинтиллятора. Наконец, в случае, когда  $\gamma$ -квант с энергией  $E_{пер}$  образует пару, электрон и позитрон уносят энергию  $E_{пер}$ , которая приведена в формуле:

$$E_{втор} = E_{пер} - 2m_0c^2 \quad (12)$$

Отсюда видно, что энергия вторичных электронов зависит от энергии первичных квантов  $E_{пер}$ , и от процесса поглощения, при котором образуются эти электроны.

При малых размерах кристаллов, в которых многократным рассеянием можно пренебречь, относительные количества электронов, обладающих энергиями  $E_{пер}$  и  $E_{втор}$ , а также энергиями, находящимися в интервале  $0 — E_{втор}$ , определяются относительными вероятностями всех трех процессов  $\tau/\mu$ ,  $\sigma/\mu$  и  $\chi/\mu$ .

Быстрые нейтроны регистрируются за счет ионизации, производимой ядрами отдачи, которые образуются при упругом рассеянии нейтронов на легких ядрах.

В специальных случаях для регистрации быстрых и медленных нейтронов могут использоваться различные ядерные реакции с выходом заряженных частиц, происходящие в сцинтилляторах под действием нейтронов. Эффективность регистрации  $\epsilon$  при этом зависит от сечения используемой реакции и от толщины сцинтиллятора [17].

На рис. 2.6 показана блок-схема простейшего однокристалльного сцинтилляционного спектрометра, в котором в качестве светочувствительного сенсора используется ФЭУ.

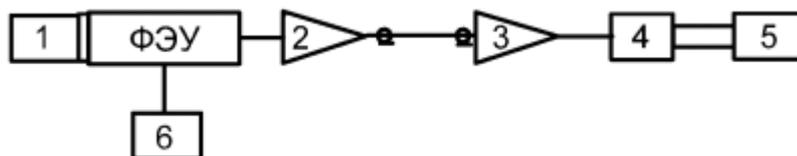


Рисунок 2.6 - Блок схема сцинтилляционного  $\gamma$ -спектрометра

Такого типа спектрометр используется в данной работе. Основными элементами сцинтилляционного спектрометра являются: сцинтиллятор 1, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), эмиттерный повторитель 2 (может отсутствовать), спектрометрический усилитель 3, анализирующее 4 (АЦП) и регистрирующее 5 (компьютер) устройства. Для питания ФЭУ используется стабильный высоковольтный источник 6, обеспечивающий постоянство напряжения на электродах ФЭУ в пределах не ниже 0,1%.

Сцинтилляционный кристалл и ФЭУ помещаются в светонепроницаемую оболочку. Это может быть металлический кожух или светонепроницаемая пленка-скотч, которой обматывают сцинтиллятор, светопровод и места соединения сцинтиллятора и ФЭУ. Между сцинтиллятором и входным окном ФЭУ должен быть обеспечен хороший оптический контакт для более полного собирания света на фотокатоде ФЭУ. Это достигается использованием специальных силиконовых масел высокой вязкости. В том случае, если детектор должен работать в магнитном поле, между сцинтиллятором и ФЭУ ставится светопровод, с помощью которого ФЭУ. режим работы которого зависит от напряженности магнитного поля, удаляется из магнитного поля. Рассмотрим более подробно процессы, происходящие в основных элементах сцинтилляционного детектора [18].

## **2.6 Фотоумножители**

Фотоумножители (ФЭУ) служат, для преобразования световых вспышек сцинтиллятора в импульсы электрического тока [19]. Основными элементами ФЭУ являются фотокатод, система ускоряющих электродов к анод, собирающий электроны (см. рис. 2.7).

Сцинтиллятор с помощью специальных масел или клея, обеспечивающих оптический контакт, прикрепляется к торцу стеклянного баллона ФЭУ. Изнутри на этот торец наносится полупрозрачный металлический слой, представляющий собой фотокатод. Свет сцинтиллятора вырывает из фотокатода электроны, которые фокусируются на первый динод

ФЭУ. Наибольшее распространение получили сурьмяно-цезиевые (Sb-Cs) фотокатоды.

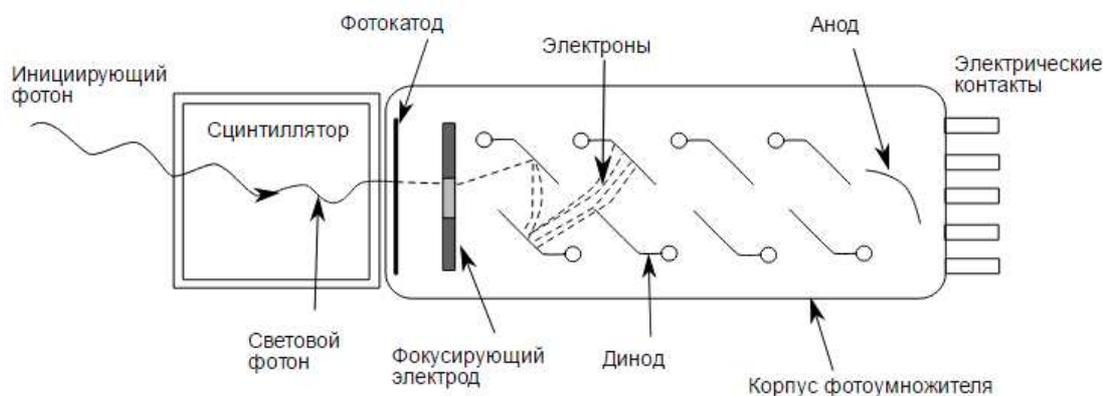


Рисунок 2.7 - Фотоумножитель

Основными характеристиками ФЭУ являются:

- квантовый выход  $\epsilon$ , который определяется как число фотоэлектронов, выбитых одним световым квантом (для лучших ФЭУ  $\epsilon = 0,2$ );
- интегральная чувствительность - отношение фототока к падающему на фотокатод световому потоку белого света (для лучших ФЭУ интегральная чувствительность составляет 100 мкА/лм);
- спектральная характеристика, которая должна перекрываться со спектральной характеристикой сцинтиллятора. Обычно максимум спектральной чувствительности ФЭУ лежит в области  $\lambda = 400$  нм;
- плотность тока тепловой эмиссии (электроны тепловой эмиссии создают фон, затрудняющий измерения);
- равномерность покрытия фотокатода, влияющая на амплитудное разрешение ФЭУ.

Попавшие на первый динод фотоэлектроны выбивают из него вторичные электроны, которые фокусируются на следующий динод. Материал динодов выбирается таким, чтобы коэффициент вторичной эмиссии был больше единицы. В этом случае происходит умножение электронов. Полный коэффициент усиления ФЭУ равен:

$$M = \theta(\delta)^n, \quad (13)$$

где  $\theta$  - коэффициент, характеризующий сбор вторичных электронов динодов;  $n$  - число умножающих динодов;  $\delta$  - коэффициент усиления динода. Коэффициент усиления ФЭУ сильно зависит от величины ускоряющего напряжения на динодах. Эта зависимость выражается формулой:

$$M = M_0 e^{U/U_0}, \quad (14)$$

где  $M_0$  и  $U_0$  - некоторые постоянные величины для данного ФЭУ.

Для поддержания постоянства величины  $M$  в пределах 1 % требуется стабильность напряжения  $U$ , подаваемого на ФЭУ, 0,01-0,1 %.

По своему применению ФЭУ делятся на спектрометрические и временные. Основным требованием, предъявляемым к спектрометрическим ФЭУ, является хорошая собственная амплитудная разрешающая способность.

Обычно она составляет 3-5%. Лучшие временные ФЭУ характеризуются временем нарастания импульса тока порядка 0,1 нс. Важной характеристикой ФЭУ является диаметр фотокатода. В зависимости от назначения применяют ФЭУ с диаметром фотокатода от 15 до 300 мм.

### **Схема включения ФЭУ**

Конструктивно ФЭУ выполняется в виде стеклянного баллона с выводами-штырьками, наподобие выводов электронных ламп. Для ФЭУ изготавливаются специальные панельки, в которые и вставляются штырьки. Такая панелька с делителем напряжения и сигнальным выводом называется базой ФЭУ. На рис. 2.8 представлены две схемы включения ФЭУ: с заземленным анодом 2.8(а) и с заземленным катодом 2.8(б). Цепочка резисторов служит делителем напряжения и обеспечивает необходимую разность потенциалов между электродами. Производители ФЭУ, как правило, дают рекомендации по выбору номиналов резисторов для работы ФЭУ в линейном режиме. Ток делителя выбирается из условия, чтобы он превышал на порядок средний ток ФЭУ при регистрации излучения. Типичное значение тока

делителя 1 мА, большие значения тока приводят к росту рассеиваемой мощности на делителе (при токе 1 мА и  $U=1500$  В,  $P = 1,5$  Вт). Конденсаторы, которые стоят между последними диодами стабилизируют режим ФЭУ, не давая возможности значительно измениться разности потенциалов между диодами при прохождении электронного сгустка. Преимущество первой схемы состоит в том, что анод ФЭУ находится под потенциалом земли и следующий каскад электроники может быть подключен напрямую без разделительного конденсатора. Последний присутствует в схеме 2.8(б), зато высоковольтный конденсатор, достаточно больших размеров, что приводит к увеличению габаритов базы и всего детектора. Недостаток первой схемы состоит в том, что с катода на баллон и конструктивные элементы, могут происходить микрозаряды, вызывая случайные импульсы.

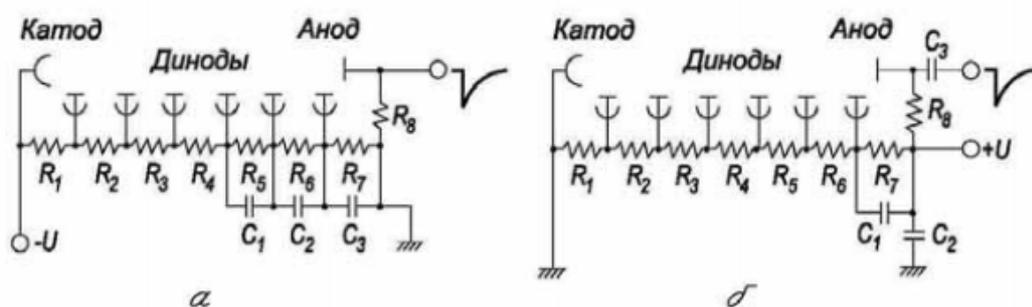


Рисунок 2.8 - Схема подачи высокого напряжения на диоды ФЭУ

а- заземленный анод, б- заземленный катод.

Значительная величина среднего тока ведет к необходимости увеличения тока делителя, к увеличению мощности источника питания и, как следствие, к нежелательному росту тепловой мощности, рассеиваемой на делителе. По своему применению в ядерной физике и физике высоких энергий ФЭУ делятся на спектрометрические и временные. Основным требованием, предъявляемым к спектрометрическому ФЭУ, является хорошая амплитудная разрешающая способность. Например, у спектрометра на основе ФЭУ-185, она составляет 6,6% по  $Cs^{173}$ . Лучшие временные ФЭУ характеризуются временем нарастания импульса тока анода 0,1нс. Важной характеристикой ФЭУ является

диаметр фотокатода. У наиболее распространенных ФЭУ диаметр фотокатода 15-45 мм; при использовании больших сцинтилляторов применяют ФЭУ, диаметр которых может достигать 290мм [20].

Импульсы тока с анода ФЭУ передаются на спектрометрический усилитель. Задача спектрометрического усилителя состоит в том, чтобы проинтегрировать импульс тока и получить импульс напряжения с амплитудой, пропорциональной энергии потерянной частицей в сцинтилляторе. Как правило, эта задача решается с помощью зарядово-чувствительной секции усилителя, которая представляет собой интегратор тока, выполненный в виде инвертирующего усилителя напряжения охваченного емкостной обратной связью. Подробно зарядово-чувствительный предусилитель рассматривается в работе по спектрометрии альфа-частиц. Эта секция может располагаться и непосредственно в базе ФЭУ, если не предусматривается использование импульса тока, обладающего коротким передним фронтом, во временных исследованиях. Импульс напряжения в дальнейших секциях формируется по длительности и усиливается до величин амплитуд, на которые рассчитан аналого-цифровой преобразователь. Требования к усилителю сигналов диктуются свойствами сцинтилляторов и, по меркам настоящего времени, сравнительно невысокие.

Линейность не хуже 1% и необходимая температурная стабильность легко обеспечиваются стандартными методами ядерной электроники. Для работы спектрометра при больших нагрузках  $10^4$  и более импульсов в секунду, когда становится существенным эффект наложения импульсов, применяются специальные методы и, в частности, аналоговые процессоры, позволяющие исключить из анализа импульсы с искаженной амплитудой в результате наложений.

Разрядность, применяемых с ФЭУ аналого-цифровых преобразователей (АЦП), редко превышает десять разрядов. Напомним, что АЦП преобразует непрерывную аналоговую величину амплитуду сигнала в цифровой двоичный код (дискретная величина). Предположим, что 10-разрядный АЦП рассчитан на

максимальный сигнал в 10 вольт. 10-разрядный АЦП выдает числа - коды в диапазоне от 0 до 1023, следовательно, одной единице кода соответствует диапазон амплитуд  $\Delta A$  приблизительно 10 мВ. Это значение есть шаг преобразования (квантования) непрерывной величины в дискретную. Числа в двоичном коде поступают в персональный компьютер, где сортируются, накапливаются и отображаются в виде гистограммы: по горизонтальной оси - код амплитуды (т.е. величина пропорциональная энергии), а по вертикальной оси - число событий с данной амплитудой [21].

### Фотоумножитель ФЭУ-110

Фотоэлектронный умножитель для преобразования световых сигналов видимой и ближней инфракрасной частей спектра в электрические сигналы в различных радиоэлектронных устройствах широкого применения. Фотокатод — сурьмяно-натриево-калиево-цезиевый, полупрозрачный, спектральная характеристика №10. Оптический вход — торцевой. Диаметр рабочей площади фотокатода 60 мм. Число каскадов усиления 12. Оформление — стеклянное, бесцокольное (РШЗ4). Масса 200 г.

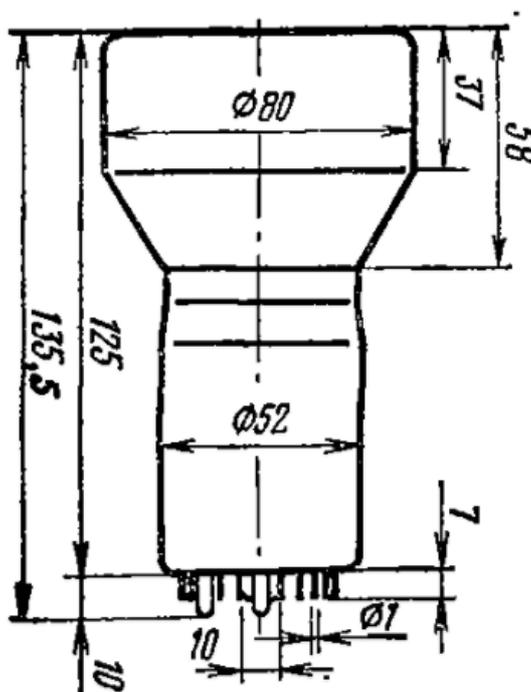


Рисунок 2.9 - Корпус ФЭУ 110

Основные параметры ФЭУ 110 при определенных условиях представлены в табл 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры ФЭУ 110

<b>Основные данные</b>			
<b>Параметр</b>	<b>Условия</b>	<b>ФЭУ-110</b>	<b>Ед. изм.</b>
Аналог	—	—	—
Область максимальной спектральной чувствительности	—	420-520	нм
Чувствительность фотокатода	—	$\geq 80$	мкА/лм
Анодная чувствительность	при $U_{пит} = 1,5$ кВ	10	А/лм
	при $U_{пит} = 2,0$ кВ	100	
Ток анода	—	$\leq 10$	мА
Темновой ток	при $U_{пит} = 1,5$ кВ	$\leq 6$	мА
	при $U_{пит} = 2,0$ кВ	$\leq 80$	
Напряжения питания	—	$\leq 2,0$	кВ
Напряжение анода	—	$\leq 80$	В
Амплитудное разрешение	с монокристаллом NaI (Тl) с диаметром 63 мм и высотой 63 мм	$\leq 11$	%
Энергетический эквивалент собственных шумов	—	$\leq 3$	кэВ
Сопротивление изоляции между электродами	—	$\geq 1 \times 10^9$	Ом
Нестабильность	при $U_{пит} = 1,5$ кВ	$\leq 2,5$	%
Наработка	—	$\geq 2500$	ч
<b>Критерии оценки</b>			
Анодная чувствительность	при $U_{пит} = 1,9$ кВ	10	А/лм

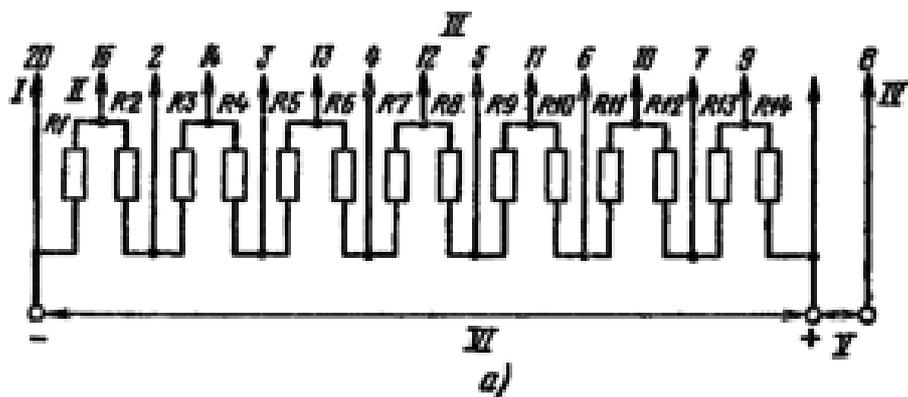


Рисунок 2.10 - Типовая схема делителя ФЭУ-110 для работы в статическом режиме.

Делитель напряжения — неравномерный:  $R_2 = 0,8 R$ ;  $R_3 = 1,2 R$ ;  $R_{14} = 0,5 R$ ;  $R_3 = \dots = R_{13} = R$ . Емкости конденсаторов:  $C_1 = 0,01 \text{ мкФ}$ ;  $C_2 = 0,025 \text{ мкФ}$ ;  $C_3 = 0,05 \text{ мкФ}$ . I – к фотокатоду; II – к модулятору; III — к диодам; IV – к аноду; V – к нагрузке; VI – к источнику питания.

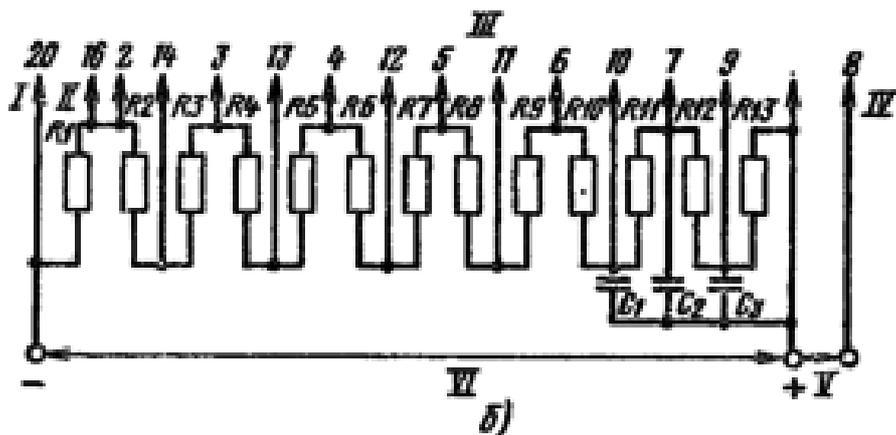


Рисунок 2.11 - Типовая схема делителя ФЭУ-110 для работы в импульсном режиме.

Делитель напряжения — неравномерный:  $R_1 = 0,7 R$ ;  $R_2 = 0,8 R$ ;  $R_3 = 0,9 R$ ;  $R_{10} = 1,2 R$ ;  $R_{11} = 1,5 R$ ;  $R_{12} = 2,2 R$ ;  $R_{13} = (2-6) R$ ;  $R_4 = \dots = R_9 = R$ . Емкости конденсаторов:  $C_1 = 0,01 \text{ мкФ}$ ;  $C_2 = 0,025 \text{ мкФ}$ ;  $C_3 = 0,05 \text{ мкФ}$ . I – к фотокатоду; II – к модулятору; III — к диодам; IV – к аноду; V – к нагрузке; VI – к источнику питания.

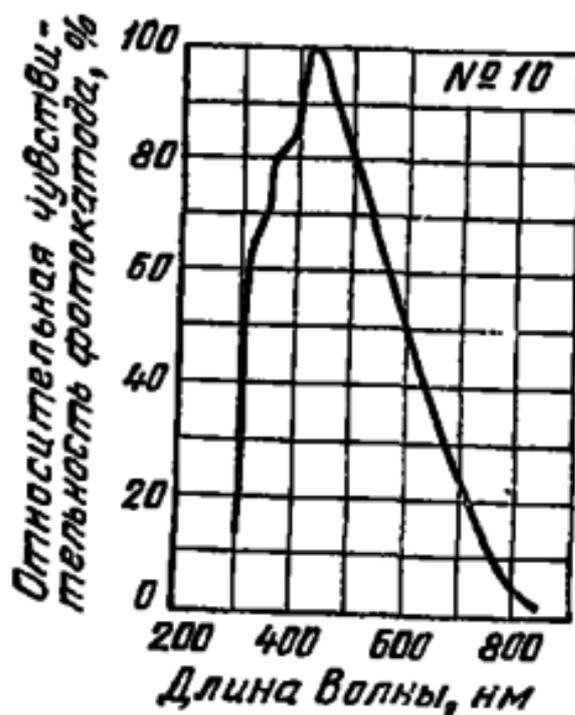


Рисунок 2.12 - Спектральная характеристика №10 для сурьмяно-натриево-калиевого полупрозрачного фотоэлектронного катода.

## 2.6 Изотоп $Co^{60}$

Изотоп  $Co^{60}$  - период полураспада 5,2 года, получают в ядерном реакторе) путем облучения стабильного кобальта ( $Co^{69}$ ) тепловыми нейтронами. Распад  $Co^{60}$  сопровождается испусканием  $\beta$ -частиц и двух  $\gamma$ -квантов;  $\beta$ -лучи поглощаются алюминиевым фильтром толщиной 0,2 мм. В практике используется только  $\gamma$ -излучение, характеризующееся большой проникающей способностью  $\gamma$ -излучение  $Co^{60}$  используется в промышленности для обнаружения дефектов

По сравнению с естественными источниками гамма-излучения (препараты естественно-радиоактивных элементов) в настоящее время значительно большей мощностью и большей доступностью обладают искусственные источники, т. е. различные радиоактивные изотопы. Среди последних наибольшее распространение получил изотоп кобальта  $Co$ , образующийся в ядерном реакторе из обычного кобальта за счет захвата ядрами

медленных нейтронов. Кобальт-60 испускает гамма-лучи с энергией 1,3 мэв и имеет период полураспада 5,27 года.

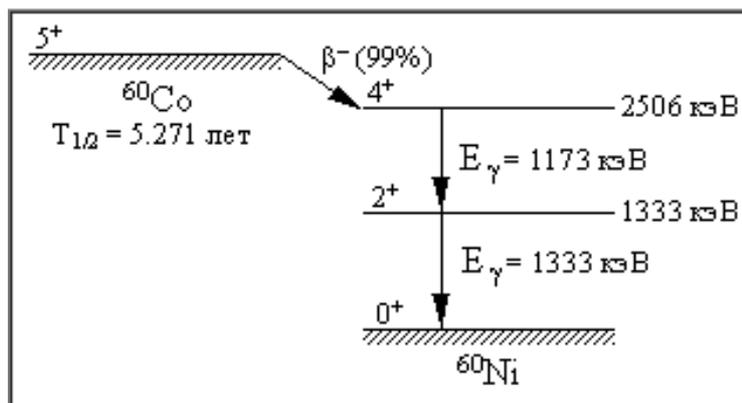


Рисунок 2.13 - Упрощенные схемы распада  $^{60}\text{Co}$

## 2.7 Модуль АЦП USB 3000

Модуль предназначен для построения мобильных компактных систем сбора и обработки аналоговой и цифровой информации. Является универсальным измерительным устройством, может использоваться как осциллограф, регистратор и анализатор спектра. Высокое быстродействие позволяет исследовать быстропротекающие процессы и широкополосные сигналы.

В состав модуля дополнительно включены двухканальный ЦАП, а также логические входные и выходные линии.

Отличительные особенности:

- Высокая частота дискретизации - до 3 МГц;
- Внутренняя буферизация входов полностью решает проблему межканального прохождения при высоких частотах переключения каналов;
- Встроенный цифровой сигнальный процессор (DSP) управляет модулем в жестком реальном времени без использования ресурсов компьютера, а также позволяет вести первичную обработку сигнала при вводе и выводе.
- Скоростной интерфейс USB 2.0 позволяет вести непрерывный дуплексный ввод/вывод данных при максимальной частоте дискретизации;

- Горячее подключение (подключение и отключение без выключения питания компьютера);
- Поддержка распространенных пакетов прикладного ПО (LabView, ACSTest, PowerGraph);
- Не требует внешнего источника питания;

Использование интерфейса USB значительно упрощает процесс подключения модуля USB3000 к компьютеру и обеспечивает возможность работы с модулем в режиме реального Plug&Play. Скоростные характеристики современной шины USB 2.0 позволяют вести непрерывный дуплексный ввод/вывод данных в режиме жесткого реального времени на максимальной скорости. Кроме того, интерфейс USB позволяет использовать модуль USB3000 в составе мобильных измерительных комплексов на базе ноутбуков.

Входные аналоговые каналы модуля USB3000 – дифференциальные. Дифференциальное подключение источника сигнала снижает уровень синфазных помех. Помимо этого, дифференциальные входы позволяют подключать источники сигнала таким образом, чтобы токи сигнальных цепей не протекали через один общий провод, что повышает точность измерений.

## **2.8 ПО «PowerGraph»**

Программный пакет PowerGraph используется для регистрации, визуализации, обработки и анализа сигналов и позволяет использовать персональный компьютер в качестве стандартных измерительных и регистрирующих приборов вольтметров, самописцев, осциллографов, спектроанализаторов [22]. Основным источником сигналов для PowerGraph являются устройства сбора данных, осуществляющие преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму и передачу их в компьютер. Уже сегодня PowerGraph позволяет работать с серийной продукцией ведущих российских и зарубежных производителей: "LCard", "Центр АЦП", "Сигнал" (все Россия), "ХОЛИТ Дэйта Системс" (Украина), "NationalInstruments" (США). И список поддерживаемого измерительного оборудования постоянно

пополняется. Однако, возможности получения данных не ограничиваются только работой с устройствами аналого-цифрового преобразования. Как универсальный инструмент, PowerGraph может использовать любые доступные источники цифровой информации виртуальные генераторы сигналов, компьютерные устройства ввода и звукозаписи, системные параметры операционной системы, а также специализированные датчики и приборы, подключаемые к компьютеру. Разнообразие используемых источников сигналов весьма велико, но все они обозначается в PowerGraph единым термином АЦП. Основной целью применения компьютера в области измерений является регистрация данных в цифровом виде. Но процессу регистрации всегда предшествует ключевой этап подготовки и настройки измерительной системы. PowerGraph не является исключением и перед началом измерений предполагает выполнение ряда предварительных действий:

- выбор устройства сбора данных;
- аппаратная настройка устройства;
- настройка регистрируемых каналов;
- калибровка входных сигналов.

Программный пакет PowerGraph включает основную программу (собственно PowerGraph) и набор специализированных утилит.

Программное обеспечение «PowerGraph» содержит расширяемую библиотеку драйверов для различных устройств:

- внутренние платы и внешние модули АЦП.
- виртуальные генераторы.
- цифровые приборы и датчики.
- компьютерные устройства ввода и звукозаписи платы.
- системные устройства компьютера и др.

Чтобы использовать какой-либо источник сигналов, достаточно при загрузке программы выбрать его в списке поддерживаемых устройств. Поддержка широкого спектра устройств сбора данных осуществляется за счет

универсальной системы драйверов, что позволяет подключать к ПО «PowerGraph» любые источники сигналов. «PowerGraph» дает возможность использовать любые аппаратные и программные настройки устройств сбора данных:

- поддержка любой разрядности АЦП.
- поддержка индивидуальных аппаратных настроек различных устройств, в том числе управление ЦАП'ами и цифровыми линиями.
- возможность разделения "физических" и "логических" каналов.
- независимая настройка диапазонов измерений и параметров регистрации для каждого из каналов.
- предварительный мониторинг входных сигналов.
- программная коррекция и калибровка входных сигналов.
- использование любых единиц измерения сигналов.
- удобная система регистрация данных
- поддержка любых скоростей записи.
- неограниченный размер регистрируемых данных.

Имеется программная и аппаратная синхронизация сбора данных (счетчики, таймеры, по уровню сигнала с записью пред- и пост-истории). В пакете есть возможность использования индивидуальных настроек для каждого типа измерений. Параметры сигналов по графикам определяются благодаря скользящим маркерам. В программе используется отображение полезной информации о записанных данных (дата и время начала записи, тип АЦП, размер данных). Имеются параметры редактирования и выделение участка данных.

Программа «PowerGraph» отображает дополнительную информацию об области выделения - индексы и время начальной и конечной точек, а также размер.

Выделение можно использовать как измерительный инструмент для определения разницы по амплитуде и времени между начальной и конечной точками. Выделенный участок данных можно копируется в отдельный блок.

Выделение используется для ограничения объема данных (выборки) при анализе и обработке данных

Программа «PowerGraph» позволяет устанавливать на ленте записи комментарии (текстовые метки), обозначающие определенную точку данных внутри блока. Комментарии отображаются на графиках как вертикальные линии и пояснительный текст, расположенные в заданных точках шкалы времени.

Использование комментариев позволяет:

- фиксировать в процессе регистрации различные события.
- разделять непрерывный набор данных блока на логические участки;
- отмечать на ленте записи отдельные значения сигнала (например, максимальное или минимальное).

В пакете имеется набор функций для цифровой обработки данных, куда входит постоянно расширяемая библиотека функций обработки сигналов (более 200 функций):

- функции копирования, калибровки и нормализации сигналов.
- арифметические и логические операции с сигналами.
- функции амплитудной и частотной фильтрации сигналов.
- функции усреднения и сглаживания сигналов.
- функции дифференцирования и интегрирования сигналов.
- функции обработки циклических сигналов.
- функции выделения огибающей.
- функции статистической обработки.
- тригонометрические, логарифмические и другие функции.

#### **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В современном мире, проектируя новые разработки, проводя эксперименты, необходимо производить оценку коммерческого потенциала и перспективности работ со стороны ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Цель данного раздела – показать оценку перспективности усовершенствования радиометрического дефектоскопа для проведения контроля дефектов. Для достижения поставленной цели был произведен FAST-анализ;

##### **4.1 FAST-анализ**

FAST-анализ основан на том, что затраты на создание и использование любого объекта состоят из необходимых и дополнительных излишних затрат, возникающих по различным причинам, например, при несовершенстве конструкции, технологических процессов, применяемых материалов или методов. Данный анализ предполагает шесть стадий.

Первая стадия – выбор объекта FAST-анализа.

Объектом исследования работы, как и FAST-анализа радиометрический дефектоскоп РД-30РМ

Вторая стадия – описание главной, основной и вспомогательной функций.

Главная функция – это функция, которая определяет назначение, сущность и главную цель создания объекта.

Главная функция объекта исследования – несущая конструкция изделия.

Основная функция – это функция, отражающая действия внутри объекта, которая обеспечивает принцип его работы и создающая необходимые условия для осуществления главной функции. Данной функцией является функция преобразования гамма-излучения в световые сигналы.

Вспомогательная функция – внутренняя функция, которая помогает реализовать основную функцию. Такой функцией является функция преобразования аналоговых сигналов в цифровые.

В таблице 4.1 представлена классификация функций, которые выполняет объект исследования.

Таблица 4.1 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали	Количество деталей	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Блок питания	2	Предоставление питания			X
Источник излучения	1	Излучение гамма-квантов на объекта контроля		X	
Сцинтилляционный кристалл NaI	1	Преобразование гамма-излучения в световые сигналы	X		
Фотоэлектронный умножитель	1	Преобразование световых сигналов в электрические		X	
Персональный компьютер	1	Обработка данных		X	
Аналого-цифровой преобразователь	1	Преобразование аналогового сигнала в дискретный код			X

В данной таблице отражены все детали, входящие в объект исследования, а так же необходимые для обеспечения работы объекта и описанием их функционирования и их рангов. Данная классификация необходима, чтобы произвести оптимизацию объекта исследования. Это необходимо для повышения эффективности процесса с помощью снижения стоимости объекта исследования и сохранения требуемого качества, при этом производя экономию путем снижения затрат на вспомогательные функции, что не повлечет за собой сильного снижения функционала объекта научного исследования.

Третья стадия – определение значимости выполняемых функций объектом.

На данной стадии применяется оценка значимости функций с помощью метода расстановки приоритетов. Основа метода – расчетно-экспертное определение значимости функций. Метод состоит из трех этапов.

На первом этапе происходит построение матрицы смежности функций. Данные представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6
Функция 1	=	<	<	<	<	<
Функция 2	>	=	<	>	>	>
Функция 3	>	>	=	>	>	>
Функция 4	>	<	<	=	>	>
Функция 5	>	<	<	<	=	>
Функция 6	>	<	<	<	<	=

После построения матрицы смежности необходимо перейти ко второму этапу, а именно к преобразованию данной матрицы в матрицу количественных соотношений функций. Данные представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	Итого
Функция 1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3
Функция 2	1.5	1	0.5	1.5	1.5	1.5	7.5
Функция 3	1.5	1.5	1	1.5	1.5	1.5	8.5
Функция 4	1.5	0.5	0.5	1	1.5	1.5	6.5
Функция 5	1.5	0.5	0.5	0.5	1	1.5	5.5
Функция 6	1.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	4,5
							35,5

На третьем этапе необходимо определить значимость функций путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по функциям. Общая сумма рассчитанных коэффициентов должна быть равной единице. Данные представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Значимость функций

№ функции	1	2	3	4	5	6
Относительные затраты	0.09	0.21	0,24	0.18	0,15	0.13

Общая сумма рассчитанных коэффициентов равна единице.

Как видно из данных таблицы, суммарный коэффициент удовлетворяет главному условию, т.е. равен 1.

Четвертая стадия – анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования.

На данной стадии необходимо с помощью определенных методов оценить уровень затрат на выполнение каждой функции.

Таблица 4.5 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Блок питания	Источник излучения	Сцинтилляционный кристалл NaI	Фотоэлектронный умножитель	Персональный компьютер	Аналогоцифровой преобразователь
Количество деталей	2	1	1	1	1	1
Выполняемая функция	Предоставление питания	Излучение гамма-квантов на объекта контроля	Преобразование гамма-излучения в световые сигналы	Преобразование световых сигналов в электрические	Обработка данных	Преобразование аналогового сигнала в дискретный код

Продолжение Таблицы 4.5

Норма расхода, кг	—	—	—	—	—	—
Трудоемкость детали, нормо-час	—	—	—	—	—	—
Стоимость материала,	2200	1500	6300	6800	28000	19000
Заработная плата, руб.	—	—	—	—	—	—
Себестоимость, руб.	2200	1500	6300	6800	28000	19000

Общая себестоимость всех функций составляет: 63800 руб.

Далее необходимо рассчитать относительные затраты на каждую функцию. Данные представлены в таблице 4.6

Таблица 4.6 – Относительные затраты на функцию

№ функции	1	2	3	4	5	6
Относительные затраты	0,04	0,02	0,1	0,11	0,43	0,3

Пятая стадия – построение функционально-стоимостной диаграммы.

Необходимо построить диаграмму, на которой будет отражена диспропорция между важностью функций и затратами на них. Диаграмма представлена на рисунке 4.1.

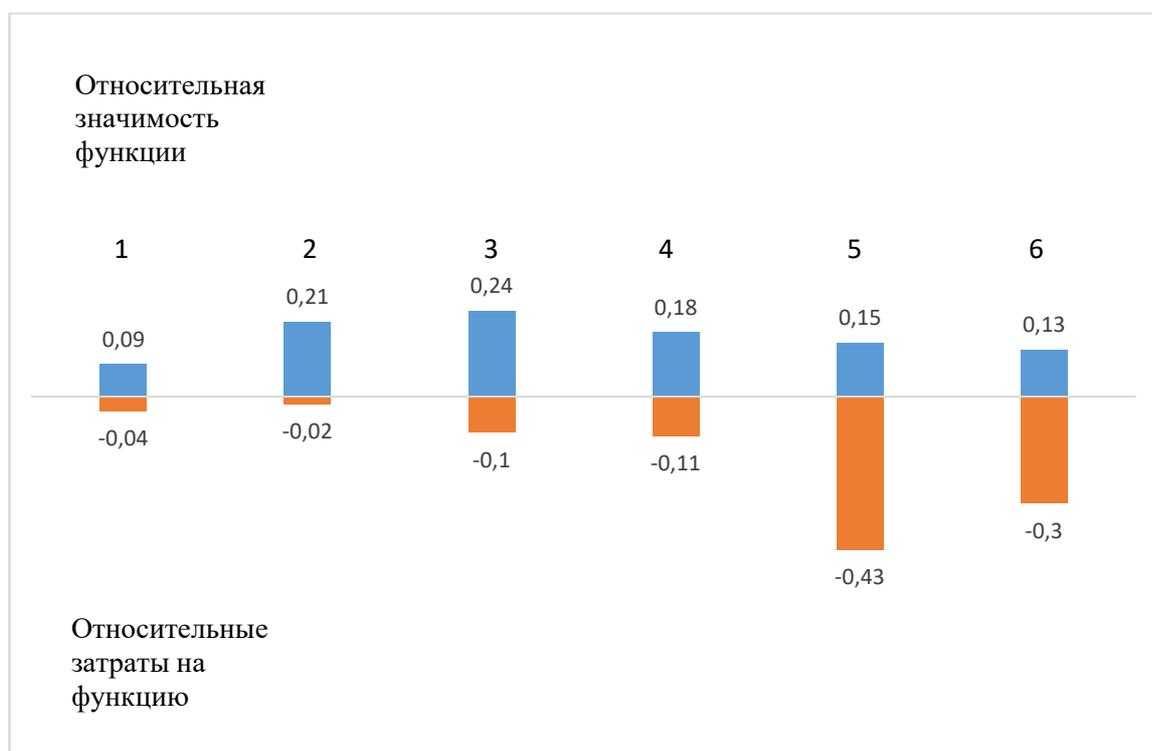


Рисунок 4.1 – Функционально-стоимостная диаграмма

По данной диаграмме можно сделать вывод о том, что существует явное не согласование между важностью функций №,5,6 и затратами на них.

Шестая стадия – оптимизация функций выполняемых объектом.

На данном этапе необходимо предложить определенные шаги, которые позволят провести экономию затрат на функции.

Проанализировав функционально-стоимостную диаграмму, можно предложить следующее: выбрать более дешевые комплектующие. Но использовать АЦП и ПК меньшей стоимости невозможно, так как основной нашей задачей было перевести обработку сигнала из аналоговой в цифровую. Разработка ведет к повышению качества при некотором, экономически оправданном увеличении затрат.

## 4.2. Инициация проекта

Цели и результат проекта: усовершенствование радиометрического дефектоскопа РД-30РМ.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых

могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта.

Информация о заинтересованных сторонах проекта представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Руководитель проекта	Использование результатов проекта в дальнейших исследованиях
Исполнитель проекта	Повышения уровня квалификации благодаря работе в научной сфере
Организация заказчик	Использование результатов интеллектуальной деятельности для повышения конкурентоспособности организации
Спонсор проекта	Развитие научных исследований и программ. Повышение уровня качества научных исследований в стране.

В таблице 4.8 представлена информация об иерархии целей проекта и требованиях к результату.

Таблица 4.8– Цели и результат проекта

Цели проекта:	Усовершенствование радиометрического дефектоскопа РД-30РМ
Ожидаемые результаты проекта:	Получение усовершенствованного дефектоскопа
Требование к результату проекта:	Дефектоскоп должен обеспечивать приемлемую погрешность измерений, фильтрацию шумов.

### 4.3. Планирование управления научно-техническим проектом.

#### 4.3.1 План проекта

Планирование управления научно-техническим проектом заключается в составлении перечня работ, необходимых для достижения поставленной цели, определение сроков их выполнения.

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Линейный график представлен в виде таблицы 4..9

Таблица 4.9 – Календарный план проекта

Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
Постановка целей и задач, получение исходных данных	2	01.02.2017	03.02.2017	И, НР
Составление и утверждение ТЗ	3	03.02.2017	06.02.2017	И, НР
Подбор и изучение материалов по тематике	20	06.02.2017	26.02.2017	И
Анализ технических возможностей	2	26.02.2017	28.02.2017	НР
Выбор структурной схемы устройства	8	28.02.2017	9.03.2017	И
Анализ программы Power graph	14	9.03.2017	23.03.2017	И
Разработка макета устройства	9	23.03.2017	1.04.2017	И
Снижение уровня шумов	10	1.04.2017	11.04.2017	И
Проведение экспериментальных исследований	12	11.04.2017	23.04.2017	И, НР
Анализ полученных результатов	5	23.04.2017	28.04.2017	И, НР
Оформление материала	5	28.04.2017	03.05.2017	И
Подведение итогов	3	03.05.2017	06.05.2017	НР, И

Таблица 4.10 – Календарный план-график

Вид работ	Исполнители	Тк	Продолжительность выполнения работ													
			Февраль			Март			Апрель			Май				
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Постановка целей и задач, получение исходных данных	И, НР	2	■													
Составление и утверждение ТЗ	И, НР	3	■													
Подбор и изучение материалов по тематике	И	20	■	■	■											
Анализ технических возможностей	НР	2				■										
Выбор структурной схемы устройства	И	8				■										
Анализ программы Power graph	И	14				■	■									
Разработка макета устройства	И	9						■								
Снижение уровня шумов	И	10							■							
Проведение экспериментальных исследований	И, НР	12								■	■					
Анализ полученных результатов	И, НР	5										■	■			
Оформление материала	И	5											■	■		
Подведение итогов	НР, И	3												■	■	

■ - исполнитель ■ -руководитель

### Бюджет научного исследования

Планирование бюджета научного исследования производится путем составления калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов.

### Сырье, материалы, специальное оборудование, покупные изделия

Стоимость всех видов и материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ формируется исходя из приобретения и платы за транспортировку. Транспортно – заготовительные

расходы принимаются в пределах от 3 до 5 % от цены материалов (в данной работе 3%). Стоимость сырья, материалов, специального оборудования, комплектующих изделий приведена в таблице 4.11

Таблица 4.11 – Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Принтер	1	2000	2000
Усилитель мощности	1	800	800
Расходные материалы	1	1000	1000
Печатная бумага	1	250	250
Канцелярские товары	1	100	100
АЦП USB-3000	1	19000	19000
Источник питания	1	2200	2200
Персональный компьютер	1	28000	28000
Радиометрический дефектоскоп	1	25000	25000
Всего за материалы			78350
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)			2350,5
Итого по статье $C_m$			80700,5

### Основная заработная плата

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, включая премии, доплаты и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}$$

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

$T_{РАБ}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дней.

$Z_{ДН}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{ДН} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D}$$

Где  $Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб.дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб.дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней.

Таблица 4.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	118	118
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	32	32
Действительный годовой фонд рабочего времени	216	216

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_6 \cdot k_p,$$

где  $Z_6$  – базовый оклад, руб;

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

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 4.13.

Таблица 4.13– Расчет основной заработной платы

Исполнители	З <sub>б</sub> , руб.	k <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб.	З <sub>дн</sub> , руб.	T <sub>р</sub> , раб.дн.	З <sub>осн</sub> , руб.
Научный руководитель	29700	1,3	38610	1856	27	50117
Исполнитель	6450	1,3	8385	403	91	36673

*Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала*

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде. Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении проекта:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где Z<sub>доп</sub> – дополнительная заработная плата, руб.;

K<sub>доп</sub> – коэффициент дополнительной зарплаты;

Z<sub>осн</sub> – основная заработная плата, руб.

В таблице 4.14 приведен расчет основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.14 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Научный руководитель	Исполнитель
Основная зарплата	50117	36673
Дополнительная зарплата	5011,7	3667,3
Зарплата исполнителей	55129,7	40340,3
Итого по статье C <sub>зп</sub>	95470	

*Отчисления на социальные нужды*

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{ВНЕБ}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Итого 30% от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением НИР:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3(55129,7 + 40340,3) = 28641 \text{ руб}$$

#### *Накладные расходы*

В данную статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, содержание, эксплуатацию, ремонт оборудования, производственного инструмента и инвентаря.

Коэффициент накладных расходов составляют 80-100% от суммы основной и дополнительной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении проекта.

Накладные расходы рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{\text{НАКЛ}} = k_{\text{НАКЛ}} \cdot (Z_{\text{ОСН}} + Z_{\text{ДОП}}),$$

где  $k_{\text{НАКЛ}}$  – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{НАКЛ}} = 0,8(55129,7 + 40340,3) = 76376 \text{ руб}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости научно-исследовательской работы (таблица 4.15).

Таблица 4.15 – Калькуляция плановой себестоимости НИР

Наименование статей затрат	Сумма, руб
Сырье, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	80700,5
Основная заработная плата	86790
Дополнительная заработная плата	8679
Отчисления на социальные нужды	28641
Накладные расходы	76376
Итого себестоимость НИР	281186,5

Вывод: В данном разделе были рассчитаны основные показатели на каждом этапе проектирования, рассчитана себестоимость продукта

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Ким В.В., Капранов Б.И. Радиометрическая дефектоскопия // XVIII Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация», 18 мая, 2017 Барнаул, Россия./ Принята к публикации.

2. Ким В.В., Капранов Б.И. Анализ геометрии и эффективности работы сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) для излучения с  $E=1250\text{КэВ}$ // XVIII Международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация», 18 мая, 2017 Барнаул, Россия./ Принята к публикации.